



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

# Effect of Titanium or Ruthenium Doping in Aluminum Films on Hillock Suppression

반도체 배선용 알루미늄 박막에서  
티타늄(Titanium) 또는 루테늄(Ruthenium)  
도핑이 hillock 형성에 미치는 영향

2019년 8월

서울대학교 대학원

재료공학부

탁 영 모

반도체 배선용 알루미늄 박막에서 티타늄(Titanium) 또는  
루테늄(Ruthenium) 도핑이 hillock 형성에 미치는 영향  
EFFECT OF TITANIUM OR RUTHENIUM DOPING IN  
ALUMINUM FILMS ON HILLOCK SUPPRESSION

지도교수: 주 영 창

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2019년 8월

서울대학교 대학원

재료공학부

탁 영 모

탁 영 모의 석사학위 논문을 인준함

2019년 6월

위 원 장	최 인 석
부 위 원 장	주 영 창
위 원	김 병 준

(인)   
(인)   
(인) 

## 초록

반도체 제품은 수십 년 동안 지속적으로 집적도가 증가하였다. 이를 통해 제품의 동작 성능이 향상시킬 수 있었고 원가를 낮추어 사용자의 욕구를 만족시킬 수 있었으며 다양한 산업군에서 더욱 효율적인 디지털 시스템을 구축하는 데에 많은 기여를 하였다. 최근에는 IoT, 인공지능(AI)와 같은 고도화 된 디지털 시스템에서 더욱 우수한 성능을 가진 반도체를 요구하고 있어 앞으로도 반도체 제품의 집적도 향상에 대한 노력은 계속 될 것이다.

이렇듯 반도체 집적도 향상은 많은 이점을 가져다 주었지만 최근에는 집적도를 향상시키면서 성능을 유지 또는 개선하는 데에 많은 어려움이 따르고 있다. 특히 반도체 성능의 척도가 되는 RC Delay 측면에서 살펴보면 집적도가 높아짐에 따라 반도체 배선의 RC Delay 가 급격히 증가하고 있으며 재료 및 공정에 대한 개선이 매우 중요해지고 있다. 이번 논문에서는 반도체 구조에서 BEOL(Back-end of line)단 공정인 금속 배선 공정에서 사용되는 알루미늄 배선에 대한 연구를 진행하였다.

알루미늄 배선은 1970 년대 이후로 현재까지 반도체 배선의 주요 재료로써 사용되고 있다. 알루미늄은 타 금속 재료와 비교하여 상대적으로 비저항이 낮으며 RIE(Reactive ion etching)가 가능하여 증착 공정이 용이한 것 등등 배선 물질로써 많은 장점을 지니고 있어 오랫동안 배선의 재료로 사용되고 있다. 하지만 낮은 녹는점으로 인해 EM(electromigration) 특성이 불량하며 특히 Si substrate 와 열팽창계수의 차이가 커서 반복 된 열처리 과정에서 발생하는 응력으로 인해 void 와 hillock 이 다발하는 문제점을 가지고 있다. 금속 배선에 void 가 발생하게 되면 저항이 높아지다가 심하면 전기적인 단선을 유발하여, 심각한 hillock 의

발생은 전기적으로 서로 분리되어야 하는 금속 배선 사이에 단락을 발생시키게 된다. 이 같은 문제는 반도체 제품에 심각한 신뢰성 불량을 야기할 수 있다. 본 연구에서는 알루미늄 배선에 다른 금속 재료를 첨가함으로써 이를 개선하고자 하였다.

알루미늄 배선에 도핑 할 금속을 선정하기 위해 녹는점, Si와의 열팽창계수의 차이를 기준으로 물질을 탐색을 하였으며 최종적으로 티타늄(Ti)와 루테튬(Ru)을 선정하였다. DC magnetron sputter 방식으로 박막 형태로 wafer 위에 증착을 진행하였으며 다양한 농도로 샘플을 제작하였다. 각각의 샘플의 두께는 모두 150nm로 증착하여 두께가 미치는 영향을 최소화 하였다.

제작된 샘플에 반복된 열처리를 하면서 응력을 측정하여 변화를 관찰하였으며 AFM 분석으로 hillock이 발생하는 정도를 비교하였다. 그 결과 Al-Ru 박막의 표면이 가장 우수한 것을 확인할 수 있었다. 이후 XRD와 TEM 분석을 통해서 박막 내부 조성과 grain의 변화를 관찰하였고 합금 박막에서 알루미늄과 도핑 물질간의 금속간화합물(intermetallic compound)가 형성되는 것을 각각 확인할 수 있었다. 또한 금속간화합물이 발생하는 온도가 응력 측정 실험에서 박막에 가해지는 압축 응력이 급격히 해소되는 구간과 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 반복된 열처리 과정에서 발생하는 압축 응력이 금속간화합물이 생성되면서 급격히 해소되면서 박막의 표면에서 발생하는 hillock의 발생이 급격히 감소하는 것을 확인하였고 특히 Ru을 도핑했을 때 그 효과가 극대화되는 것을 실험으로 증명하였다.

**표제어:** Aluminum interconnect, Aluminum, thin film stress,  
stress induced hillock, grain boundary diffusion, Al-Ti,  
Al-Ru

**학 번:** 2017-20608

# 목차

1	서론	
1.1	반도체 소자의 배선	1
1.2	알루미늄 배선의 장점	5
1.3	알루미늄 배선의 문제점	8
1.4	본 논문의 구성	11
2	이론적 배경	
2.1	박막에 작용하는 응력	12
2.2	박막의 응력 분석	15
3	실험 방법	
3.1	박막의 증착	20
3.1.1	도핑 방법	20
3.1.2	증착 조건의 선정	23
3.2	Hillock의 정량적 분석	27
4	결과 및 고찰	
4.1	박막의 전기적 특성	29
4.2	박막에 작용하는 응력	34
4.3	박막의 미세구조 분석	39
4.3.1	표면 거칠기 분석	39
4.3.2	Hillock의 정량적 분석	43
4.3.3	집합조직의 TEM 분석	45
4.3.4	결정립(grain) 크기 분석	48
5	요약 및 결론	53

참고 문헌 .....	54
-------------	----

Abstract .....	57
----------------	----



## LIST OF TABLES

<b>Table 1.1</b>	Properties of interconnect materials [1.3]
<b>Table 3.1</b>	Al and Al alloy thin film deposition condition

## LIST OF FIGURES

<b>Figure 1.1</b>	Minimum feature size scaling trend for Intel logic technologies. [1.1]
<b>Figure 1.2</b>	Trends for improving transistor performance and reducing active power. (a) Transistor performance. b) Performance per watt. [1.1]
<b>Figure 1.3</b>	The optimal combination of conductors, insulator, and barriers is the key to performant interconnects. It will allow to achieve the reliable integration increasingly important in future technology nodes. [1.2]
<b>Figure 1.4</b>	In situ SEM images, showing the sequence of hillock formation: (a) at room temperature, (b) initial stage at 194°C, after annealing (c) for 1 h 41 min and (d) for 3 h at 194°C. [1.9]
<b>Figure 2.1</b>	Illustration of the relationship between the biaxial stress in a

thin film and the associated bending of the substrate.[2.1]

**Figure 2.2** The MOS system uses an array of parallel beams to illuminate the sample. The position of the beams is measured with a CCD camera. A frame-grabber digitizes the image and the MOS software calculates the beam spacing,  $d$ . Stress-induced curvature in the sample changes the spacing of the reflected beams. (by k-Space Associates, Inc.)

**Figure 2.3** Stress in thin films induces curvature in the substrate. The MOS system measures the curvature optically by monitoring the deflection of parallel beams of light.(by k-Space Associates, Inc.)

**Figure 2.4** Stress-temperature plot for an Al film on a Si substrate. Elastic and plastic deformation occur in the film during heating and cooling. [2.1]

**Figure 3.1** Verifying dopant element and the number of chip on Aluminum sputtering target

**Figure 3.2** Ti and Ru concentration change as a function of the number of dopant chip

**Figure 3.3** SEM images of (a) Al film (b) Al-Ti alloy thin films (c) Al-Ru alloy thin films made by DC magnetron sputter.

**Figure 3.4** Hillocks and voids were extracted using the image processing method that classifies the brightness of the AFM image.

- Figure 4.1** Resistivity of Aluminum and Aluminum alloy films after 400°C heat treatment.
- Figure 4.2** Biaxial Stress change during thermal cycling by wafer curvature analysis in (a) Al film (b) Al-Ti alloy thin films (c) Al-Ru alloy thin films. Drastic compressive stress release was observed in Al alloy thin films(dotted line).
- Figure 4.3** XRD result in 4~32at.%Ti doped Al alloy films. Al<sub>3</sub>Ti(112) peak(red arrow) were observed all doped samples.
- Figure 4.4** XRD result in 14~32at.%Ru doped Al alloy films. Al<sub>6</sub>Ru(110) peak(red arrow) were observed all doped samples.
- Figure 4.5** XRD result in Al-14at.%Ru alloy films according to heat treatment temperature(100~500°C) for 1hr. It was found that the Al<sub>6</sub>Ru peak appears at over 300°C.
- Figure 4.6** Surface roughness(RMS) of Al and Al alloy films after 400°C annealing. It was found that the roughness of Al-Ru alloy films was improved.
- Figure 4.7** Surface image of Al and Al alloy films using AFM analysis after 400°C annealing. Hillocks in Al-Ru alloy films were mostly suppressed.
- Figure 4.8** (a) Hillocks and (b) voids count are plotted as a function of height.

- Figure 4.9** Plane-view TEM micrographs of (a) Al film (b) Al-Ti alloy thin films (c) Al-Ru alloy thin films. The grain size of all samples was enlarged after heat treatment.
- Figure 4.10** EDS image in Al-14at.%Ti films, showing that Al<sub>3</sub>Ti was precipitated
- Figure 4.11** EDS image in Al-14at.%Ru films, showing that Al<sub>6</sub>Ru was precipitated.
- Figure 4.12** Texture and grain morphology image in Al-14at.%Ti and Al-14at.%Ru alloy films after heat treatment.
- Figure 4.13** Grain size distribution in (a) Al-14at.%Ti and (b)Al-14at.%Ru alloy film after heat treatment.
- Figure 4.14** Misorientation angle distribution of grain boundaries in (a) Al-14at.%Ti and (b)Al-14at.%Ru alloy film after heat treatment.

# 1. 서론

## 1.1. 반도체 소자의 배선

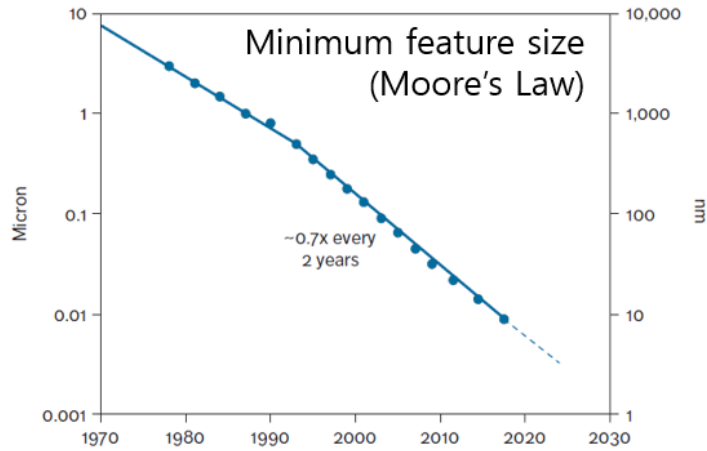
반도체는 ‘산업의 쌀’이라고 불린다. 현대 산업의 거의 모든 분야에 필수적으로 사용되기 때문이다. 특히 4차 산업혁명 시대를 이끌어갈 인공지능(AI), 사물인터넷(IoT), 자율 주행차 등의 분야에서 가시적인 성과들이 나타나고 있고 발전속도가 빨라지고 있기 때문에 이러한 산업에서 중심적인 역할을 하게 될 반도체의 중요성과 그 수요는 더욱 커질 전망이다. 따라서 4차 산업의 발전이 지속될 수 있도록 더욱 우수한 성능과 낮은 원가의 반도체를 개발하는 것이 절실히 요구되고 있다.

우수한 성능과 낮은 가격의 반도체 소자를 제조하기 위해서는 집적도를 향상시키는 것이 매우 중요하다. 집적도를 향상시키면 동일한 면적의 wafer위에 더욱 많은 반도체 칩을 생산할 수 있어 제조원가를 낮출 수 있으며, 이와 더불어 반도체 트랜지스터의 채널 길이(channel length)를 감소 시킬 수 있어 트랜지스터의 RC delay가 개선되어 성능 개선 효과도 얻을 수 있다. 고성능을 가지는 낮은 가격의 반도체를 생산하기 위하여 1960년대 이후로 수십 년 동안 무어의 법칙으로 불리는 추세를 따라서 Figure 1.1과 Figure 1.2와 같이 반도체의 집적도는 향상되어 왔다. 하지만 집적도를 향상시키는 것은 반도체 생산 기술의 전반에 걸쳐서 극복해야 할 많은 과제를 던져주었다. 본 연구에서는 반도체 여러 공정 중 BEOL(Back-end of line) 공정에 해당하는 금속 배선(interconnect) 공정에 대해서 논의하고자 한다.

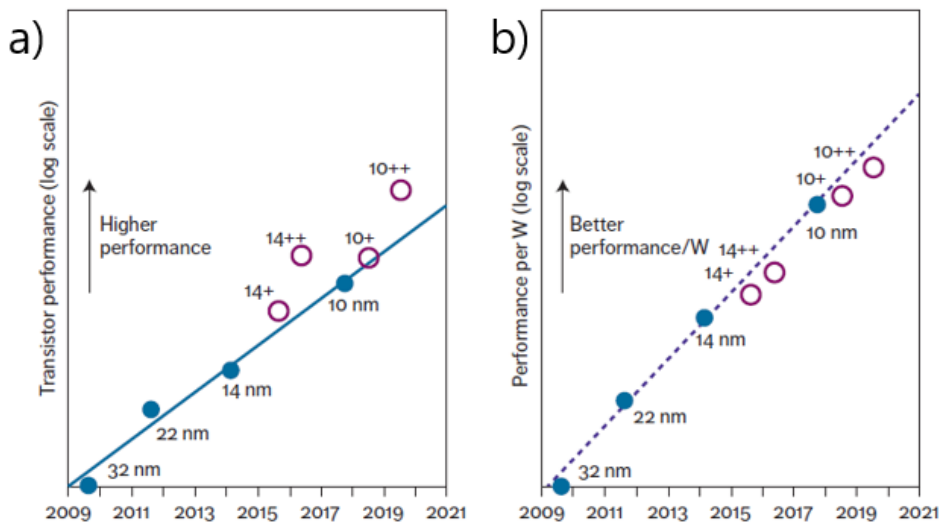
금속 배선은 반도체 소자의 트랜지스터와 외부와의 전기적 신호를 전달하는 역할을 한다. Figure 1.3은 금속 배선을 구성하는 요소와 금속 배선이 갖추어야 할 중요한 성능을 간단한 그림으로 나타내고 있다. 금속 배선은 크게 데이터를 직접적으로 전달하는 conductor와 이를 전기적으로 분리하는 유전체, 그리고 전도체와 유전체 사이의 상호 확산을 막아주고 접착력을 향상시키는 barrier로 구성되어 있다. 이 세가지 구성 요소의 재료 및 구조를 최적화 했을 때 고성능의 신뢰성이 우수한 금속 배선을 제조할 수 있다.

최근에 반도체 칩은 더욱 소형화되고 있어  $1\text{cm}^2$ 의 면적에 무려 수십 억 개의 트랜지스터가 집적되는 수준까지 이르렀다. 이에 따라 트랜지스터를 연결하는 금속 배선의 라인간 간격도 수십 나노미터까지 줄어들었고 그 구조 또한 복잡해지고 있다. 조밀한 간격과 복잡한 구조는 이전에는 문제가 되지 않았던 여러 신뢰성 문제를 유발하고 있다.

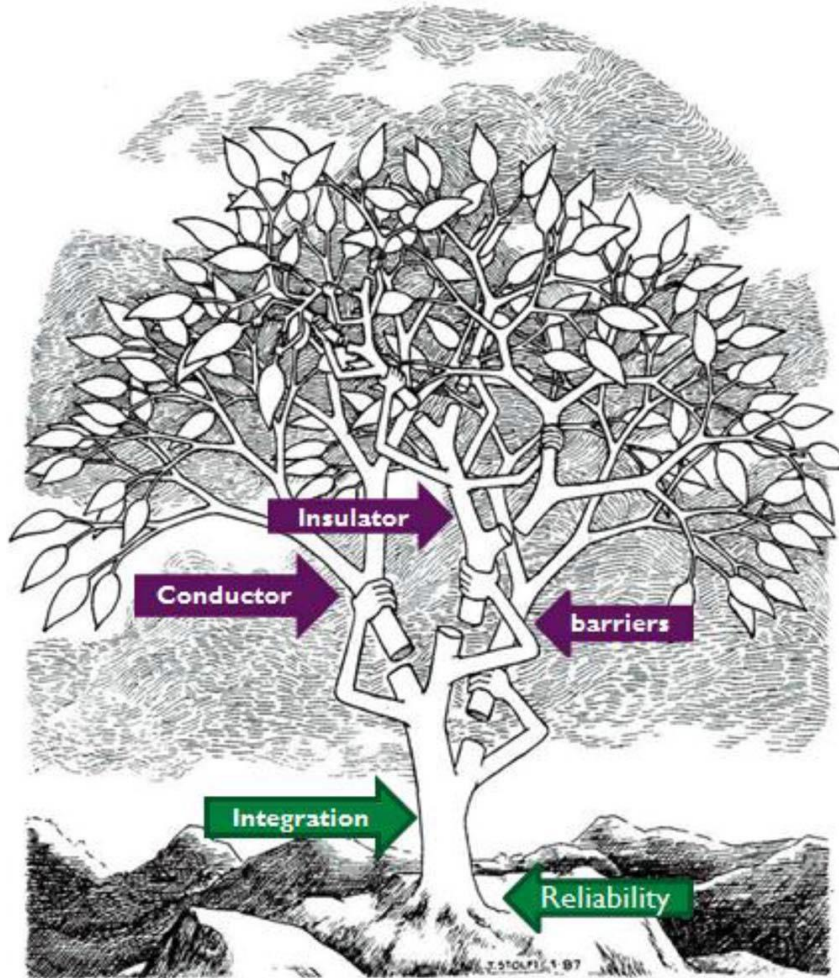
알루미늄은 1970년대 이후로 현재까지 금속 배선의 재료로써 널리 사용되고 있다. 알루미늄이 가지고 있는 다양한 장점 때문에 앞으로도 오랫동안 사용될 것으로 예측된다. 하지만 앞서 말한 고도화 된 집적화로 인하여 알루미늄 배선에서도 신뢰성 문제가 대두되고 있다. 따라서 알루미늄 배선의 신뢰성에 대한 연구는 중요한 의미를 가질 수 있을 것이다.



**Figure 1.1 Minimum feature size scaling trend for Intel logic technologies. [1.1]**



**Figure 1.2 Trends for improving transistor performance and reducing active power. (a) Transistor performance. B) Performance per watt. [1.1]**



**Figure 1.3** The optimal combination of conductors, insulator, and barriers is the key to performant interconnects. It will allow to achieve the reliable integration increasingly important in future technology nodes. [1.2]



## 1.2. 알루미늄 배선의 장점

금속 배선은 반도체 소자의 트랜지스터와 외부 사이의 데이터를 전달하는 통로로서의 역할을 한다. 금속 배선이 본연의 역할을 충실히 수행하기 위해서는 데이터를 최대한 빠르게 전달할 수 있어야 하고 기대되는 수명 기간 동안 데이터의 유실이 없이 정확하게 전달해야만 한다. 이를 위해서 금속 배선이 갖춰야 할 특성은 다음과 같다.

첫째, 데이터의 빠른 전달을 위해서 낮은 비저항을 가져야 한다. RC delay는 반도체의 성능을 표현하는 대표적인 척도이다. RC delay는 식 1.1과 같이 표현된다.

$$RC = \frac{\rho}{t_M} \frac{L^2 \epsilon_{ILD}}{t_{ILD}} \quad (1.1)$$

여기에서  $\rho$ 는 금속 배선 재료의 비저항,  $t_M$ 은 금속 배선의 두께,  $L$ 은 금속 배선의 길이,  $\epsilon_{ILD}$ 는 유전체의 유전율,  $t_{ILD}$ 는 유전체의 두께를 각각 의미한다. 이 중에서 금속 배선의 재료와 관련된 항목은 비저항이 유일하다고 할 수 있다. 따라서 금속 배선의 RC delay 개선을 위해서는 비저항이 낮은 재료를 사용하는 것이 무엇보다 중요하다.

둘째로 금속 배선에 인접한 유전체와의 상호 오염이 없어야 한다. 금속 배선이 유전체로 쉽게 확산이 되면 강한 전기장이 가해졌을 때 원하지 않는 전기적인 단락을 유발하게 되어 반도체 신뢰성에 치명적인 문제를 유발할 수 있다. 이 같은 문제를 피하기 위하여 유전체로 쉽게 확산되는 금속 배선 재료를 사용할 경우에는 배선과 유전체 사이에 barrier 층을 삽입하여 이를 개선할 수 있으나 barrier층을 삽입하게 되면 제한된 면적에서 barrier가 면적의 일부를 차지하게 되어 배선 전체의 저항을 상승시키는 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 금속 배선 재료 그 자체가

유전체와의 상호 오염이 없는 성질을 가지는 것이 매우 중요하다.

이외에도 유전체와의 접착력이 우수해야 하며 증착 공정이 용이해야 하는 등의 성질을 가져야 한다.

알루미늄은 앞서 언급한 금속 배선으로써의 장점을 많이 가진 재료이기 때문에 1970년대 이후로 현재까지 지속적으로 금속 배선의 재료로써 사용되고 있다. Table 1.1과 같이 반도체 배선으로 사용될 수 있는 물질 중에서 상대적으로 낮은  $2.7\sim 3.0\mu\Omega\text{cm}$ 의 비저항을 가지고 있으며  $\text{SiO}_2$ 를 기본으로 하는 유전체와의 접착력이 우수하여 barrier 층이 필요하지 않다. 또한 RIE(Reactive ion etching)이 가능하여 패터닝이 용이하다.

이처럼 알루미늄은 배선으로써 많은 장점을 가지고 있지만 집적도 향상이 지속됨에 따라 알루미늄 배선 라인간 간격이 줄어들고 그 구조가 복잡해지면서 신뢰성 문제가 발생할 가능성이 높아지고 있다. 다음 절에서는 알루미늄 배선의 신뢰성 문제에 대해 논의하겠다.

<b>Material</b>	<b>Thin film Resistivity(<math>\mu\Omega\text{cm}</math>)</b>	<b>Melting Point (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>
Cu	1.7~2.0	1084
Al	2.7~3.0	660
W	8~15	3410
PtSi	28~35	1229
TiSi <sub>2</sub>	13~16	1540
Wsi <sub>2</sub>	30~70	2165
CoSi <sub>2</sub>	15~20	1326
NiSi	14~20	992
TiN	50~150	~2950
Ti <sub>30</sub> W <sub>70</sub>	75~200	~2200
Polysilicon (heavily doped)	500~1000	1410

**Table 1.1 Properties of interconnect materials. [1.3]**

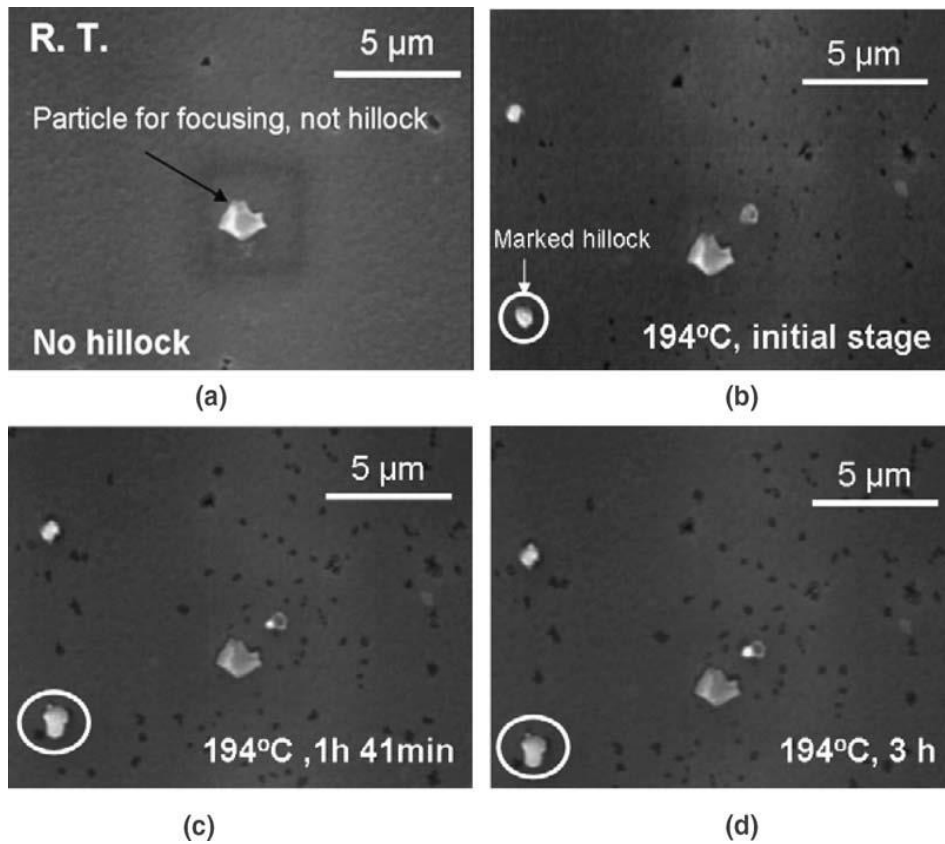
### 1.3. 알루미늄 배선의 문제점

알루미늄 배선은 증착 된 이후에 후속 공정을 진행하면서 필수적으로 반복되는 승온과 냉각이 반복되는 열처리 과정을 거치게 된다. 이 과정에서 알루미늄 배선과 Si substrate와의 열팽창계수(Coefficient of thermal expansion)의 차이로 인하여 알루미늄 배선에는 상당한 팽창, 압축 응력이 반복적으로 작용하게 된다.[1.4] 열처리 과정에서 알루미늄 배선에 응력이 가해지면 이를 해소하기 위하여 결정립계(grain boundary)를 따라서 물질의 확산이 발생하게 되는데 이를 stress-migration이라고 칭한다.

알루미늄 배선에 인장응력이 가해지면 void가 형성되어 응력이 해소되고 압축응력이 가해지면 hillock을 통해 해소된다. Void와 hillock이 발생하는 대표적인 기구는 계면 확산(interfacial diffusion), 표면 확산(surface diffusion), 결정립계 확산(grain-boundary diffusion)으로 알려져 있다.[1.5-8] 온도의 변화에 따라서 박막 내부에서 취약한 부분으로 물질의 확산이 발생하는 것이다.

Figure 1.4는 glass substrate위에 Mo barrier를 증착 한 후 알루미늄 박막을 400nm 증착한 시료에 열을 가하면서 in-situ SEM 분석을 진행한 결과이다. 시료에 열을 가해 일정한 온도를 유지시켰을 때 상온에서는 관찰되지 않던 hillock이 발생한 것을 확인 할 수 있다. 또한 박막의 두께와 열처리 온도가 hillock의 형성에 영향을 미친다는 연구 결과도 확인 할 수 있다.[1.10] 캐핑층으로 둘러 쌓인 Al-0.5%Cu의 메탈 라인에서 발생한 void에 대한 연구도 진행되었다.[1.11-12] 이와 같이 알루미늄 박막 또는 패터닝 된 배선 라인에 void 또는 hillock이 발생한 사례는 쉽게 찾아 볼 수 있다.

메탈 배선에 Hillock이 발생하게 되면 배선과 배선 사이에 전기적인 단락을 발생시켜 반도체가 정상적으로 동작할 수 없는 치명적인 문제를 유발할 수 있다. 최근에는 반도체 배선이 더욱 복잡해지고 메탈 배선이 무려 17층에 다다를 정도로 다층화 되고 있는 상황에서 이러한 문제는 더욱 심각해지고 있다. 그러므로 알루미늄 배선에 작용하는 응력이 발생하는 기구에 대한 연구를 통해 hillock과 void의 발생을 억제하는 연구가 요구된다.



**Figure 1.4 In situ SEM images, showing the sequence of hillock formation: (a) at room temperature, (b) initial stage at 194°C, after annealing (c) for 1 h 41 min and (d) for 3 h at 194°C. [1.9]**

---

## 1.4. 본 논문의 구성

지금까지 반도체 금속 배선과 그 주요 재료로 사용되는 알루미늄의 장점과 문제점에 대해 알아보았다. 알루미늄은 반도체 금속 배선으로써 많은 장점을 가지고 있기 때문에 앞으로도 지속적으로 사용 될 것으로 예상되는데 반도체가 고도로 집적화 됨에 따라서 앞으로 많은 신뢰성 문제가 발생할 것으로 예상되고 있다.

알루미늄 배선에서 hillock이 발생하는 원인 중의 하나로 stress-migration 현상을 들 수 있다. 2장에서는 stress-migration이 발생하는 기구에 대해 학습하고 이를 개선할 수 있는 방법에 대한 이론적 배경에 대해서 논의하였다.

3장에서는 연구를 위한 시료를 제작하는 방법과 박막에 작용하는 응력을 측정하고 미세구조의 변화를 분석하는 방법론에 대해 알아보고 그 결과를 4장에 기술하였다.

마지막으로 5장에서 연구 내용을 정리 요약하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1. 박막에 작용하는 응력 해소 기구

벌크의 실리콘 substrate 위에 증착 된 박막은 후속 공정을 거치면서 반복적인 열처리 과정을 거치게 된다. 이 과정에서 박막에는 상당한 기계적 응력이 작용하는데 nix 는 Figure 2.1 과 같이 이를 설명하였다.[2.1] 증착 된 박막에 열이 가해지면 substrate 와 박막의 열팽창계수의 차이로 인하여 평면 방향으로 면적의 변화가 발생하게 된다. 이 후 냉각이 진행되면 면적이 원래의 상태로 돌아오려고 하는데 이 때 substrate 굽힘이 발생하고 substrate 에 비해 매우 얇은 박막에 상당한 크기의 응력이 작용하는 것이다. 벌크에 비해 박막의 두께가 매우 얇으므로 박막의 두께를 없다고 가정하면 substrate 의 굽힘에 따른 곡률은 다음과 같이 표현된다.

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{M_s} \frac{6\sigma_f h_f}{h_s^2} \quad (2.1)$$

여기에서  $K$  는 곡률,  $M_s = (E/1-\nu)_s$  는 벌크 substrate 의 이축 탄성 계수,  $\sigma_f$  는 박막에 작용하는 이축 응력,  $h_f$  는 박막의 두께,  $h_s$  는 substrate 의 두께이다. 식 (2.1)을 통해 박막에 가해지는 응력을 구하면 다음과 같다.



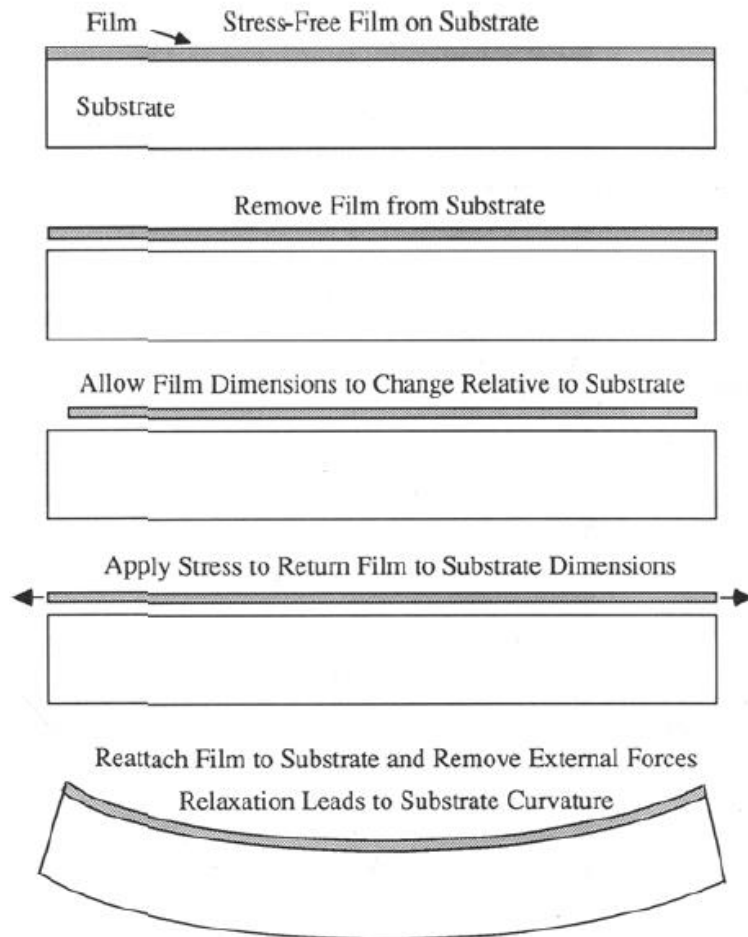
$$\sigma_f = M_s \frac{h_s^2}{6h_f R} \quad (2.2)$$

위와 같이 열처리에 의해서 박막에 작용하는 응력은 박막에 변형을 가져오는데 이는 substrate 와 박막의 열팽창계수를 통해 표현할 수 있다. 박막의 변형률은 아래 식 (2.3)과 같다.

$$\varepsilon = -(\alpha_f - \alpha_s)(T - T_0) = -\Delta\alpha\Delta T \quad (2.3)$$

지금까지 열처리 후 박막에 작용하는 응력에 대해서 알아보았다. 박막에 응력이 작용하면 이를 해소하려는 과정을 거치게 되는데 그 과정은 벌크의 그것과는 근본적으로 다르며 해소를 위해 박막에 다양한 변형이 발생하게 된다. 응력이 항복 응력에 미치기 전에는 탄성 변형이 발생하며 이후에는 소성 변형이 발생하게 되며 이 때 substrate 와 박막에 작용하는 응력을 해소하는 대표적인 기구로는 전위 활주, 결정립 성장, 결정립계 확산 크립, power-law 크립 등을 들 수 있다.

일반적으로 300℃ 이하의 낮은 온도에서는 전위 활주가 지배적이며, 300℃ 이상의 높은 온도에서는 전위의 상승을 동반하는 power-law 크립 또는 결정립계 확산 크립이 지배적이라고 알려져 있다.[2.2-6] 이 같은 다양한 응력 해소 기구들은 박막의 재료, 두께, 온도, 캐핑층의 유무, substrate 계면과의 접착력 등에 따라 복합적으로 응력 해소 기구들이 작용하게 된다.



**Figure 2.1 Illustration of the relationship between the biaxial stress in a thin film and the associated bending of the substrate.[2.1]**

## 2.2. 박막의 응력 분석

박막에 작용하는 응력을 분석하는 것은 X-ray 회절을 이용하여 Bragg식으로부터 변형률을 구해내는 방법, 광학 간섭을 이용하는 방법, 레이저 스캐닝 분석법 등등 다양 방법이 있다. 이 중에서 결정화 된 박막의 경우에는 레이저 스캐닝 분석법이 주로 사용된다.[2.1, 2.7] 본 연구에서는 레이저 스캐닝 분석법을 수행할 수 있는 k-Space Associates, Inc.에서 제공하는 MOS(Multi-beam Optical System) 장비를 사용하여 wafer 곡률 분석을 진행하였다.

이 분석법의 원리는 매우 간단한데 Figure 3.4에 장비의 구조를 나타내었다. 측정을 위해서는 먼저 시편을 챔버에 넣고 진공 상태를 만들어 준 후에 챔버 내부 유체의 흐름에 따른 시편의 진동을 막기 위해서 펌핑을 종료하고 불활성인  $N_2$  가스를 소량 주입하여 일정한 압력을 유지해 준다. 본 연구에서는 진공 압력은  $5 \times 10^{-6}$ Torr, 측정 압력은 1mTorr를 유지하였다. 이후 평행하게 일정한 간격을 가지는 레이저 빔을 시편에 조사하면 시편의 곡률에 따라서 레이저 빔의 위치가 변화하게 되는데 이 때 레이저 빔 사이의 거리의 편차( $\delta d$ )를 구할 수 있다. 이후 이를 Stoney식에서 유도한 식 3.1 에 대입하여 응력을 도출할 수 있다.

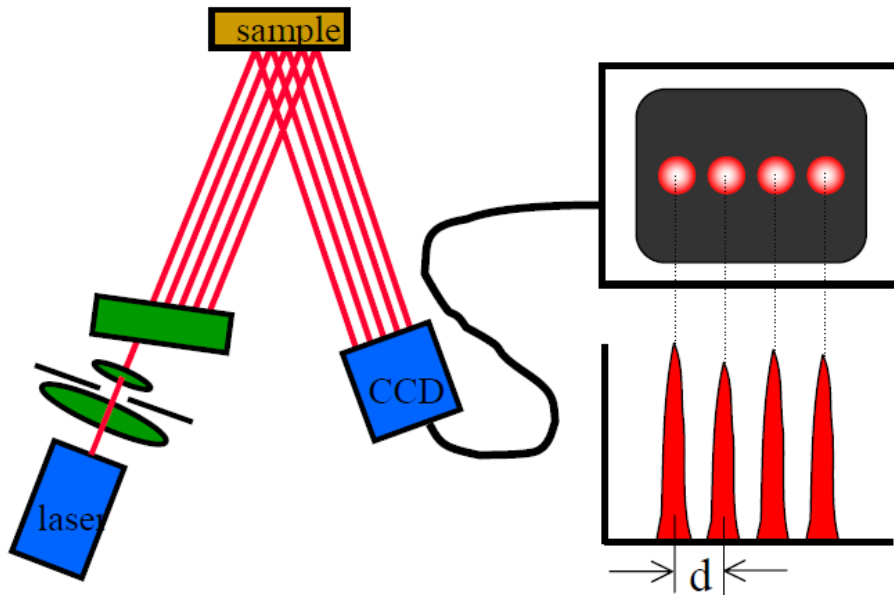
$$\bar{\sigma} h_f = \frac{\delta d M_s h_s^2 \cos \alpha}{d \cdot 12L} \quad (2.4)$$

여기에서 각각의 항목은 Figure 3.5를 참고하기 바란다.

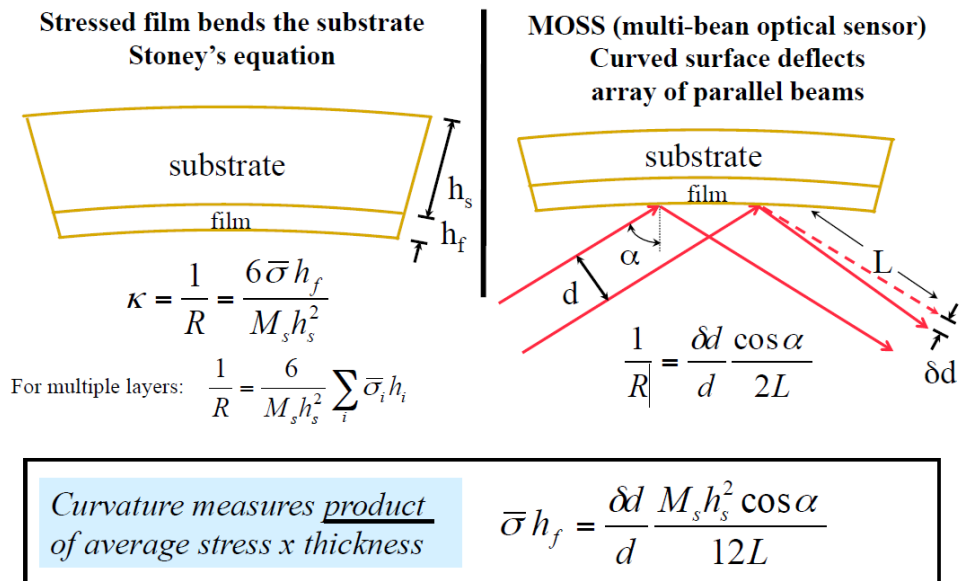
이렇게 구해진 응력을 온도의 변화에 따라서 그래프로 나타내면 Figure 3.6과 같이 나타낼 수 있다. Figure 3.6은  $SiO_2$ 가 증착 된 Si substrate위에 알루미늄 박막 590nm를 증착하고  $450^\circ C$ 로 열처리를 한

후 레이저 스캐닝 분석을 진행한 결과이다.[2.1] 일반적으로 순수한 알루미늄의 경우 많은 문헌에서 이와 유사한 응력 거동을 보여준다. Nix는 초기에는 박막과 Si substrate와의 열팽창계수 차이로 인하여 응력 변화의 기울기가 일정한 탄성변형 구간이 나타나며 이축 항복 압축응력 지점에 다다르면 소성 변화가 시작된다고 설명하고 있다.

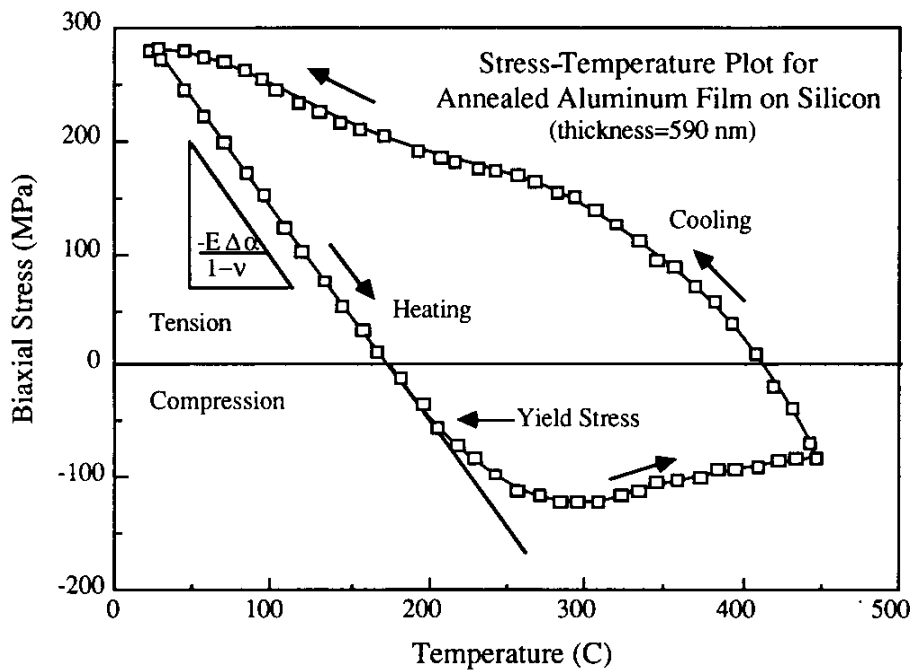
본 논문에서는 위에서 설명한 레이저 스캐닝을 이용한 wafer 곡률 분석벽을 사용하여 순수한 알루미늄 배선과 도핑 된 알루미늄합금 배선에 작용하는 이축 응력의 차이를 비교할 예정이다.



**Figure 2.2** The MOS system uses an array of parallel beams to illuminate the sample. The position of the beams is measured with a CCD camera. A frame-grabber digitizes the image and the MOS software calculates the beam spacing,  $d$ . Stress-induced curvature in the sample changes the spacing of the reflected beams. (by k-Space Associates, Inc.)



**Figure 2.3 Stress in thin films induces curvature in the substrate. The MOS system measures the curvature optically by monitoring the deflection of parallel beams of light.(by k-Space Associates, Inc.)**



**Figure 2.4 Stress-temperature plot for an Al film on a Si substrate. Elastic and plastic deformation occur in the film during heating and cooling. [2.1]**

## 3. 실험 방법

### 3.1. 박막의 증착

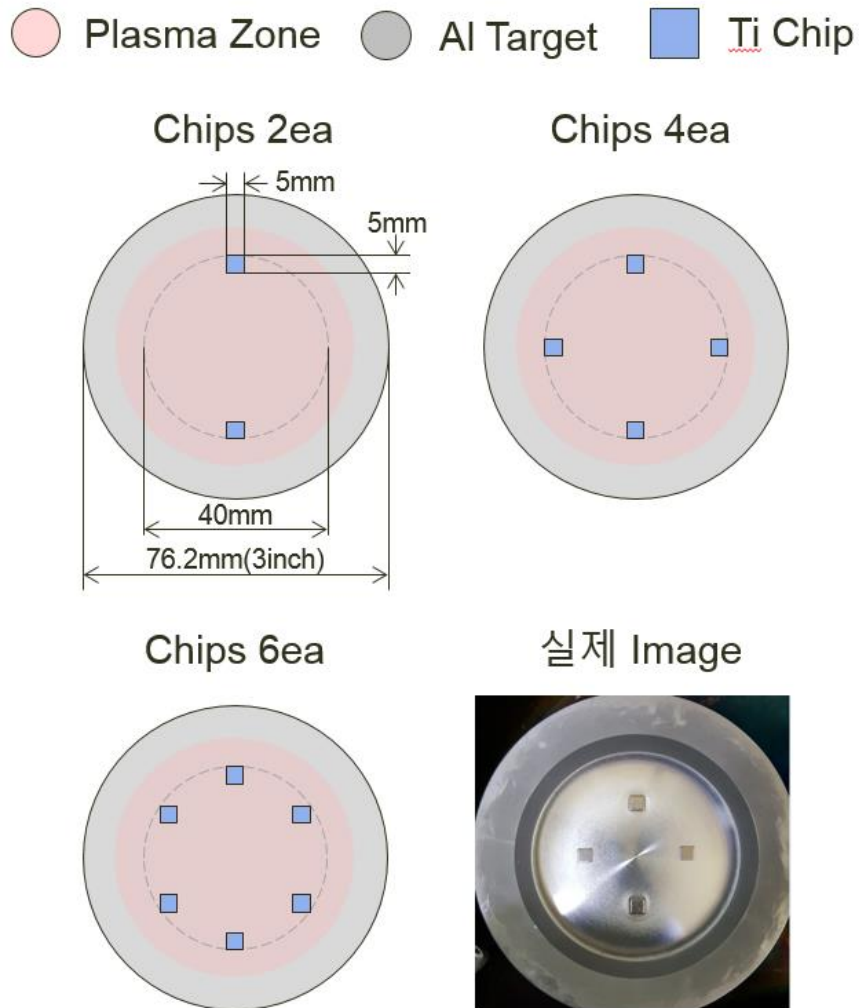
#### 3.1.1. 도핑 방법

시료는 Si substrate 위에 100nm 의 SiO<sub>2</sub> 가 증착 된 웨이퍼(wafer)에 알루미늄 또는 알루미늄합금 박막을 증착하였고 웨이퍼는 20mm×20mm 로 절단하여 일정한 크기로 제작하였다. 알루미늄과 알루미늄합금 박막은 DC 마그네트론 스퍼터(DC magnetron sputter) 방식을 사용하여 증착하였다.

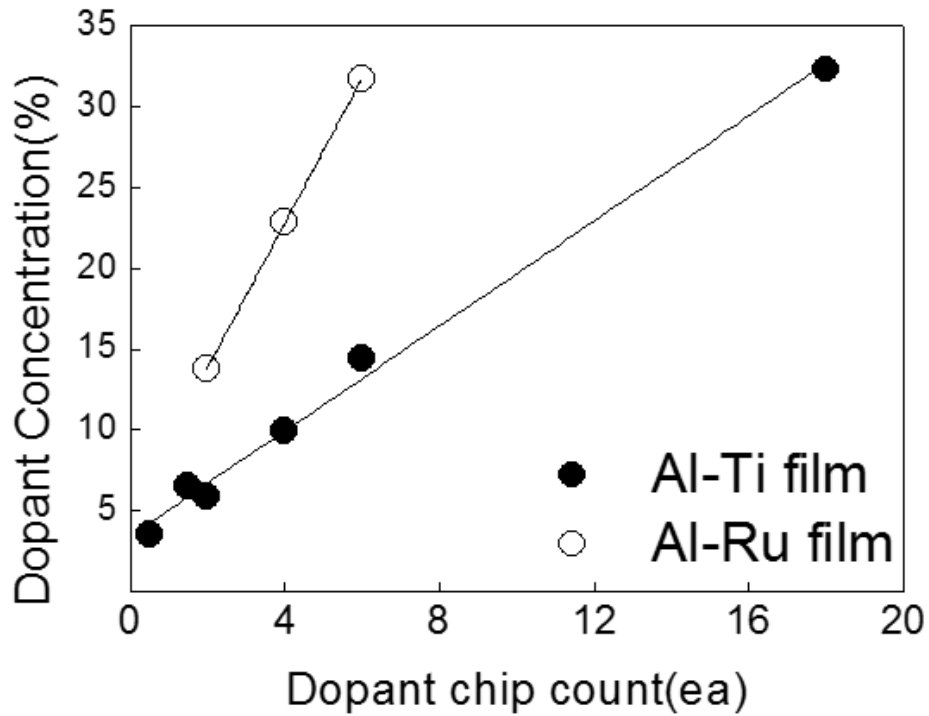
알루미늄합금을 제작하기 위하여 도핑 방법을 결정해야 했는데 도핑 원소와 농도를 다양하게 조절하기 위해서 Figure 3.1 과 같이 알루미늄 스퍼터 타겟 위에 도핑하고자 하는 메탈 칩(chip)의 개수를 조정하면서 얹어 놓는 방식을 채택했으며 플라즈마가 형성되는 영역에 도핑 할 메탈 칩을 균등하게 배치하여 농도가 균일한 박막이 증착 될 수 있도록 하였다.

알루미늄합금을 도핑 칩의 개수를 달리하여 증착하였을 때 Figure 3.2 와 같이 칩의 개수와 도핑 농도가 선형적인 관계를 보여주어 원하는 농도의 알루미늄합금 박막을 제작할 수 있음을 확인했다. 알루미늄 박막에 도핑을 했을 때 발생하는 특성의 변화를 확인하기 위하여 Ti 와 Ru 의 농도가 14at.%, 23at.%, 32at.%에 해당하는 시료를 제작하였고 모든 시료는 2 분 동안 Ar pre-flow 공정을 삽입하여 플라즈마가 안정적으로 형성된 후 증착을 진행하였다.





**Figure 3.1 Verifying dopant element and the number of chip on Aluminum sputtering target**

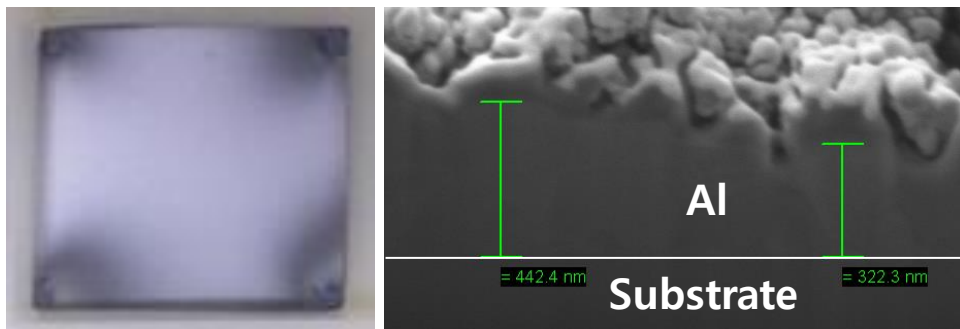


**Figure 3.2** Ti and Ru concentration change as a function of the number of dopant chip

### 3.1.2. 증착 조건의 선정

실제 반도체 제품에서 사용되는 알루미늄 배선의 두께는 100nm대까지 낮아졌다. 라인간 간격이 좁아지면 hillock과 void에 의한 신뢰성 문제가 발생할 가능성이 증가하기 때문에 실제 제품에서 사용되는 배선의 두께와 유사한 박막을 증착하는 것이 중요하다고 판단했다.

따라서 가장 먼저 스퍼터링 방식을 이용하여 양질의 Al 박막을 증착 할 수 있는 조건을 확인하는 실험을 진행하였다. 알루미늄 박막을 200nm 이상 증착 할 경우 박막의 형태로 증착 되지 않고 Figure 3.2와 같이 나노 입자의 형태로 증착 되어 박막의 응력 거동 확인에 부적합한 형태를 가지게 되었다. 이러한 문제가 존재할 경우 표면의 난반사로 인하여 Al 박막이 은빛이 아닌 우유 빛을 띠게 된다.



**Figure 3.2 Surface morphology of Al thin film by sputtering for 5 minute. Surface agglomeration was observed.**

이 문제를 해결하기 위해 증착 조건 시 발생하는 3가지 변수를 조정하는 연구를 진행 하였다. 3가지 변수는 각각 플라즈마 파워, 증착 압력, 증착 시간으로 두고 연구를 진행 하였다. 변수들의 조정 범위는 각각 파워의 경우 100~400W, 압력의 경우 1~5mT, 시간의 경우는 1~5min으로 지정하여 각각의 변수를 조절하여 양질의 Al 박막을 얻기 위한 실험을 진행 하였다.

고정된 증착 시간에서 증착 파워와 증착 압력에 따라 Al 박막의 거칠기가 크게 개선되지 않는 결과를 보여주었다. 따라서 가장 중요한 변수는 증착 시간이라는 것을 파악하였고, 증착 시간을 조절하여 박막의 거칠기를 개선하고자 하고자 하였다. 결과적으로 일정 파워, 압력 조건에서 증착 시간이 1분 50초를 넘어가면 우유 빛을 띠는 현상을 발견하였고 각 증착 조건 별 최대 증착 시간이 존재한다는 것을 도출해 낼 수 있었다. 이에 대한 원인으로는 연구실의 스퍼터 장비에는 증착 시 기판 온도를 조절할 수 있는 시스템이 존재하지 않아 증착 시간이 길어지는 경우 증착 시 발생하는 열에 의해 기판의 온도가 상승하여 비정상적인 결정립 성장(grain growth)이 발생하고 이로 인해 표면의 알루미늄 입자가 뭉치게(agglomeration)되어 발생하는 것으로 추정된다.

위에서 진행 된 일련의 실험을 바탕으로 알루미늄과 알루미늄합금 박막의 두께는 150nm로 선정하였으며 플라즈마 파워, 증착 압력은 각각 400W, 1mT(Ar 18sccm)로 선정하였고 증착 시간은 목표 두께인 150nm에 맞추어 시료를 제작하였다. 각 도핑 그룹별 증착 조건은 Table 3.1과 같다.

이렇게 제작 된 시료는 최종적으로 SEM분석을 통해 검증하였으며 Figure 3.3과 같이 각각의 시료가 약 150nm의 두께로 정상적으로 증착 된 것을 확인 할 수 있었다.

	<b>Pure Al</b>	<b>Al-Ti</b>	<b>Al-Ru</b>
Method	DC magnetron sputtering		
Plasma Power	400W		
Plasma Gas	Ar		
Initial Pressure	$5 \times 10^{-6}$ Torr		
Working Pressure	1mTorr		
Temperature	Room Temp.		
Target thickness	150nm		
Sputtering Time	1min 28sec	1min 28sec	57sec
Dopant chip	-	5x5mm 6~18ea	5x5mm 2~6ea

**Table 3.1 Al and Al alloy thin film deposition condition**

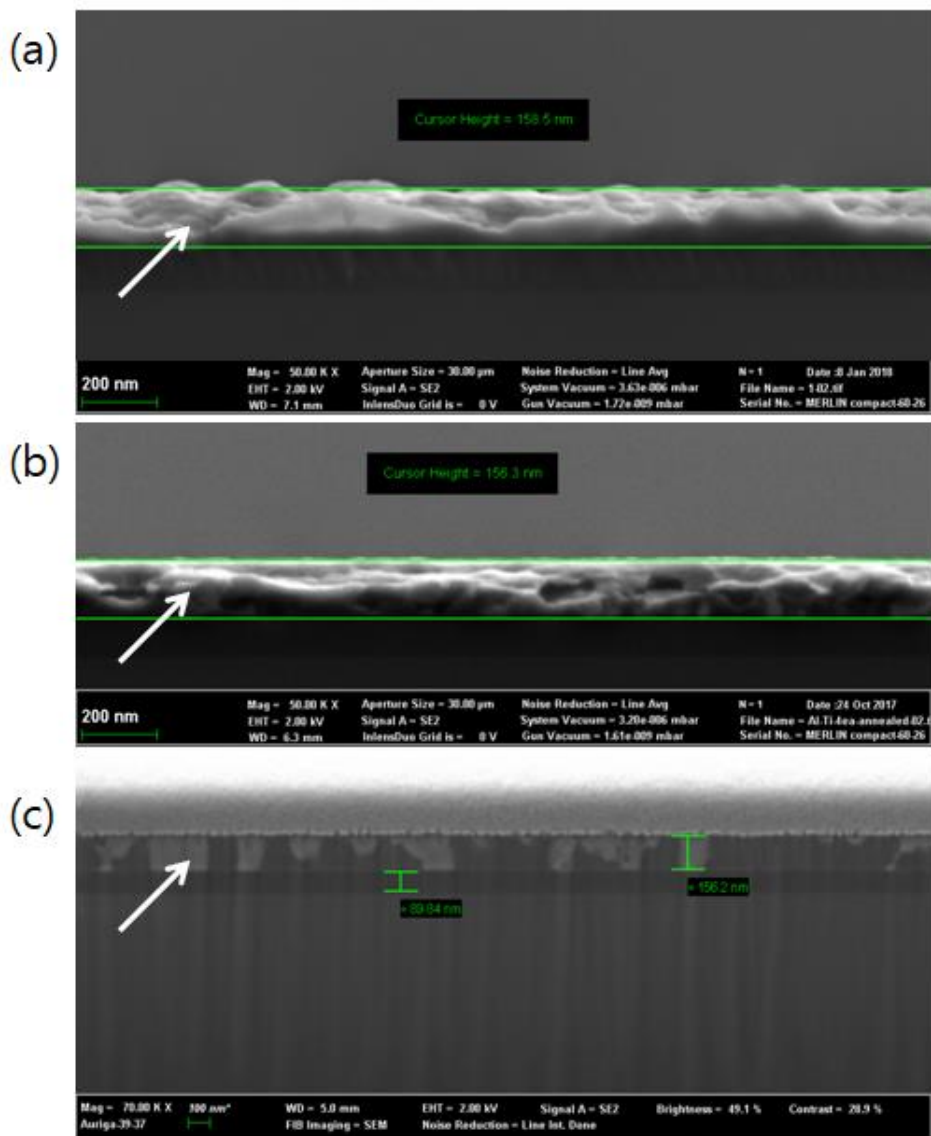


Figure 3.3 SEM images of (a) Al film (b) Al-Ti alloy thin films (c) Al-Ru alloy thin films made by DC magnetron sputter.

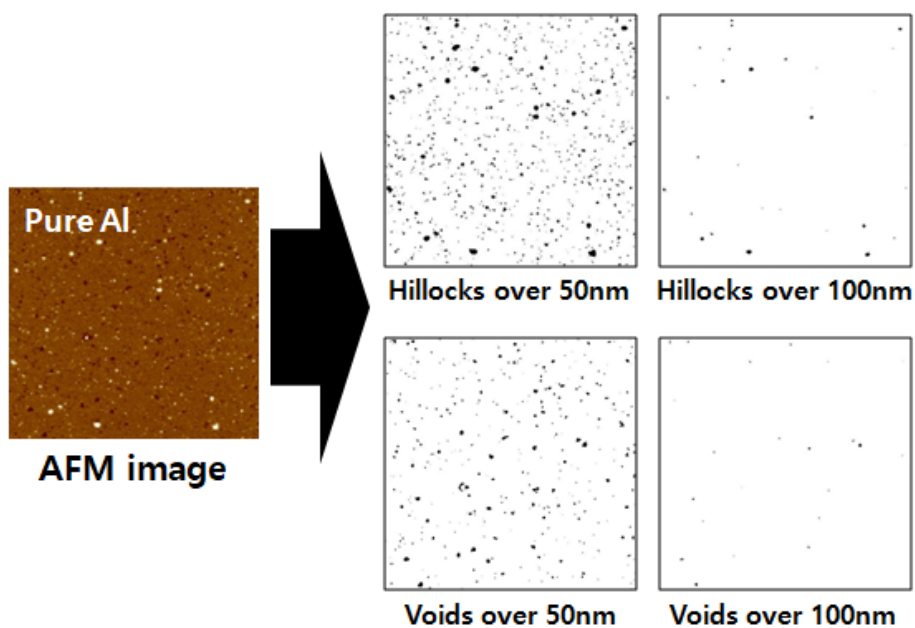
### 3.2. Hillock의 정량적 분석

알루미늄과 알루미늄 합금 박막에서 발생한 hillock의 개수를 정량적으로 비교하는 연구를 진행하였다.

우선 AFM(Atomic force Microscope) 분석을 사용하여  $40 \times 40 \mu\text{m}^2$ 의 면적에 대한 표면 스캔을 진행하여 알루미늄과 알루미늄 합금 박막의 거칠기를 비교하였다. AFM은 장비는 Park SYSTEMS사의 NX10 모델을 사용하였다. 이렇게 측정한 AFM 이미지를 사용하여 동일한 면적에 발생한 hillock의 개수를 비교하는 작업을 진행하였다.

Figure 3.7에 AFM 이미지의 처리 방식을 간단하게 나타내었다. AFM 이미지의 각 화소는 시료 표면의 높이를 나타내고 이는 밝기의 차이로 표시되는데 밝은 부분은 돌출된 영역이며 어두운 부분은 함몰된 것을 의미한다. 따라서 각 화소의 밝기 분류하는 이미지 처리를 진행하여 시료 표면에 존재하는 hillock과 void를 추출해 낼 수 있었다. 추가적으로 이미지의 밝기를 세분화하여 분류를 하면 다양한 높이에 따른 hillock과 void를 추출해 낼 수도 있었다.

이렇게 얻어진 결과를 통해서 알루미늄과 알루미늄합금 박막에서 발생한 hillock과 void의 높이에 따른 개수의 차이를 정량적으로 비교하여 hillock의 밀도와 크기를 측정하였다.



**Figure 3.4 Hillocks and voids were extracted using the image processing method that classifies the brightness of the AFM image.**



## 4. 결과 및 고찰

본 연구에 사용된 시료는 순수한 알루미늄 박막과 Al-14at.%Ti, Al-23at.%Ti, Al-32at.%Ti, Al-14at.%Ru, Al-23at.%Ru, Al-32at.%Ru 박막으로 총 7가지로 제작되었다.

### 4.1. 박막의 전기적 특성

반도체 금속 배선의 가장 중요한 특성으로 낮은 비저항을 꼽을 수 있다. 4 포인트 프로브 장비를 사용하여 배선의 비저항을 측정했다.

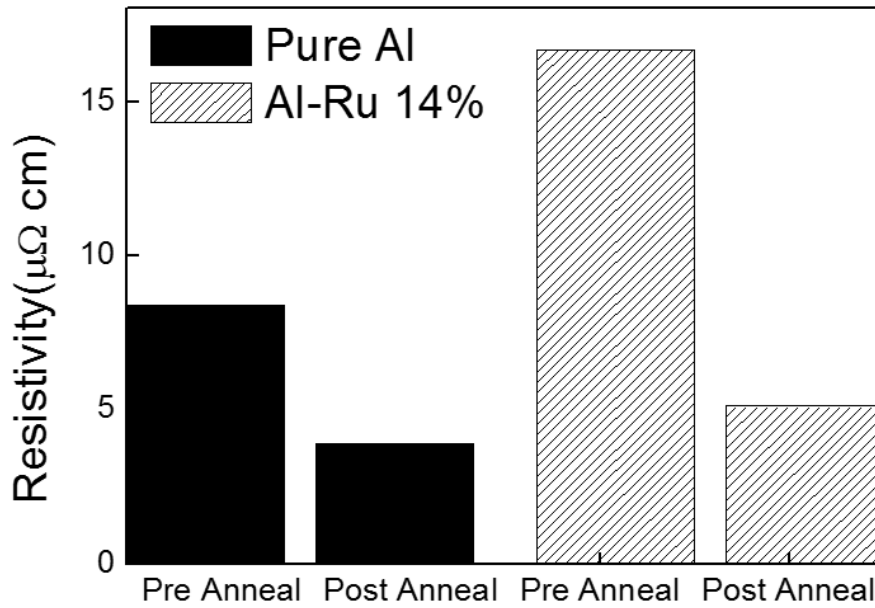
Figure 4.1 은 알루미늄과 Al-Ru 합금의 열처리 전후에 대한 비저항 측정 결과이다. 열처리 전후로 순수한 알루미늄 박막과 합금 박막 모두 비저항이 각각 53%, 69% 감소하였다. 일반적으로 스퍼터를 이용해 증착된 메탈 박막의 비저항은 열처리 이후에 감소하며 이는 결정립 성장에 의한 것으로 알려져 있다. 알루미늄과 합금 박막 모두 큰폭으로 감소되었으며 큰 차이점은 보이지 않았다.

Figure 4.2 은 알루미늄과 알루미늄합금 박막의 비저항(resistivity) 측정 결과이다. 모든 시료의 비저항은 400℃에서 열처리 후 측정하였는데 알루미늄 박막의 비저항은 다른 문헌에서 보고된  $2.7\sim 3.0\mu\Omega\text{cm}$  에 거의 근접한  $3.12\mu\Omega\text{cm}$  로 확인되었으며 이를 토대로 양질의 박막을 증착한 것을 알 수 있었다.

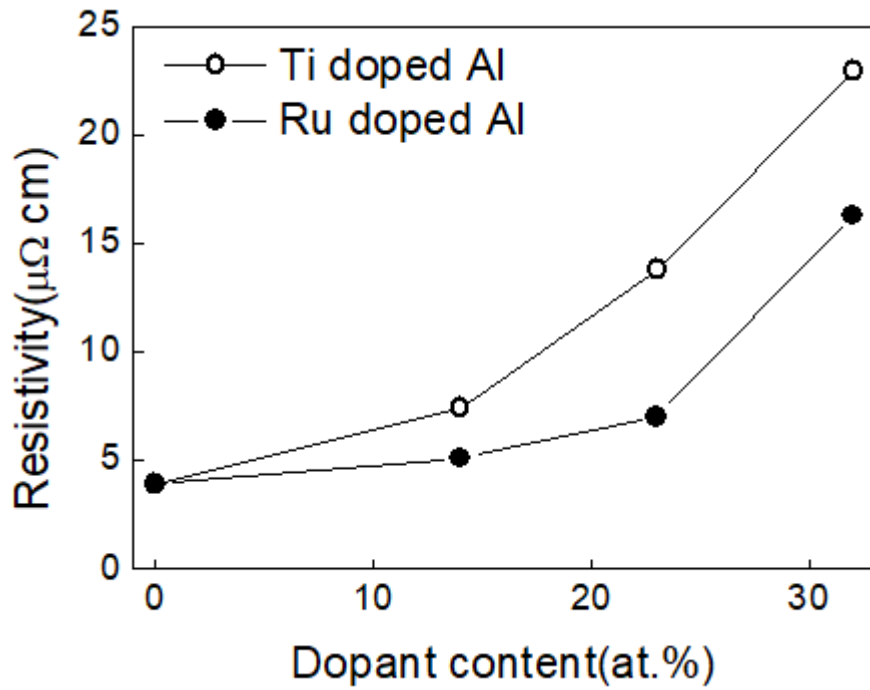
다음으로 알루미늄합금 박막을 살펴보자. Ti 와 Ru 을 도핑 했을 때 모두 동일하게 도핑 농도가 증가할수록 비저항 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 반도체 배선 물질로써 광범위하게 사용되는 알루미늄과 구리에 다른 금속 물질을 도핑 한 다양한 연구에서 동일하게 확인되는

현상이다. 순수한 알루미늄에 합금 원소가 첨가되면 불순물의 역할을 하게 되어 전자의 산란이 증가하여 저항 또한 증가하게 되는 것이다.

하지만 Ti 와 Ru 을 도핑 한 경우 둘 사이에는 뚜렷한 차이가 있는데 Ti 을 도핑했을 경우에 비저항의 증가폭이 2 배 이상 큰 것을 확인 할 수 있었다. Al-14at.%Ru 의 경우에 비저항의 증가폭이 가장 적었으며 비저항은  $3.92 \mu\Omega\text{cm}$  로 순수한 알루미늄의 비저항인  $3.12 \mu\Omega\text{cm}$  와 비교하여 약 30% 증가하는 것을 알 수 있다.



**Figure 4.1 Resistivity of Aluminum and Al-14at.%Ru before and after 400°C heat treatment.**



**Figure 4.2 Resistivity of Aluminum and Aluminum alloy films after 400 °C heat treatment.**

## 4.2. 박막에 작용하는 응력

금속 배선은 증착 된 후 후속 공정을 거치면서 반복되는 열처리 과정을 거치게 된다. 이 과정에서 Si substrate와 금속 배선의 열팽창계수의 차이로 인하여 금속 박막은 온도에 따라서 압축 또는 인장 응력을 받게 된다.

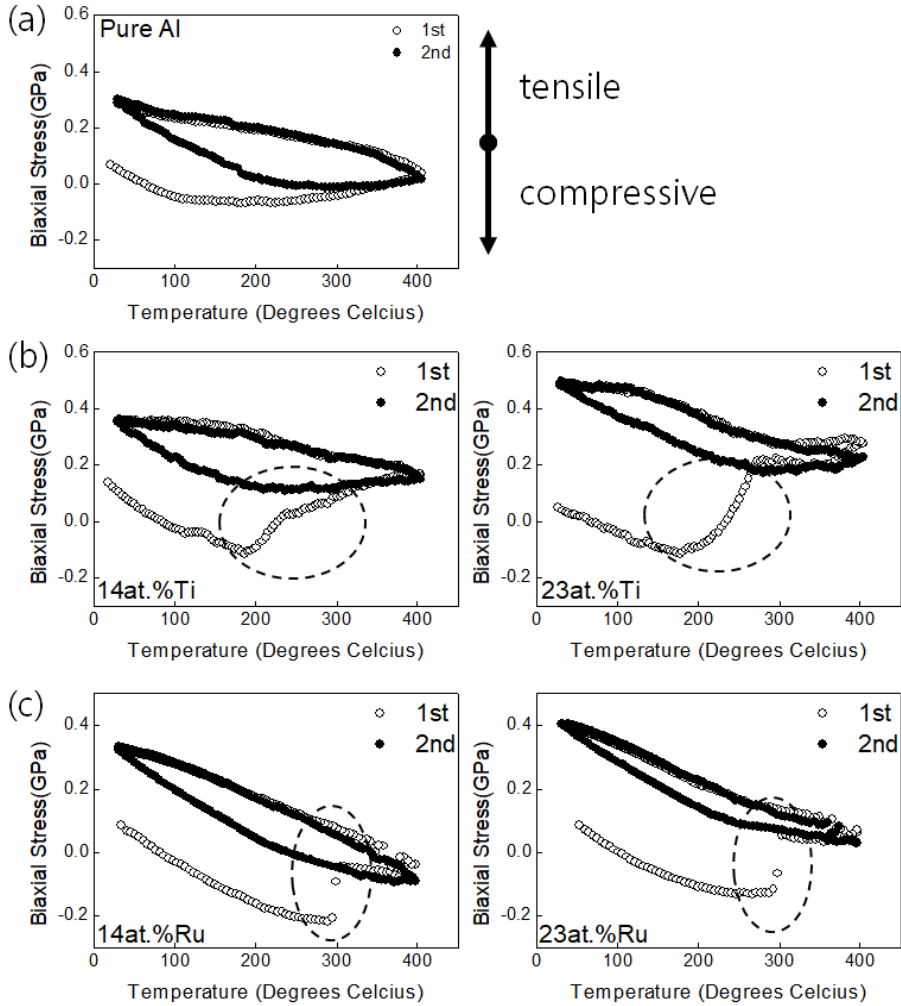
Figure 4.3는 열처리 과정에서 알루미늄과 알루미늄합금 박막에 작용하는 응력을 wafer curvature 분석 방법으로 측정한 결과이다. 열처리는 상온에서 400℃까지 2회 반복하여 진행하였으며 온도의 ramping rate은 5℃/분으로 진행하였다.

순수한 알루미늄의 경우에는 3.2장에서 논의된 것과 유사한 모습을 보여주고 있다. 하지만 알루미늄합금 박막에서는 응력이 다른 거동을 보여준다. Al-Ti합금 박막에서 약 200~300℃ 온도 구간에서 압축 응력이 해소되는 모습을 보여주고 있으며 Al-Ru합금 박막에서도 290~300℃ 온도 구간에서 동일하게 압축 응력이 해소되고 있다. 특히 Al-Ru합금 박막에서는 압축 응력이 더욱 빠른 속도로 해소되는 것을 확인 할 수 있다. 이는 순수한 알루미늄 박막에서는 볼 수 없는 현상이다.

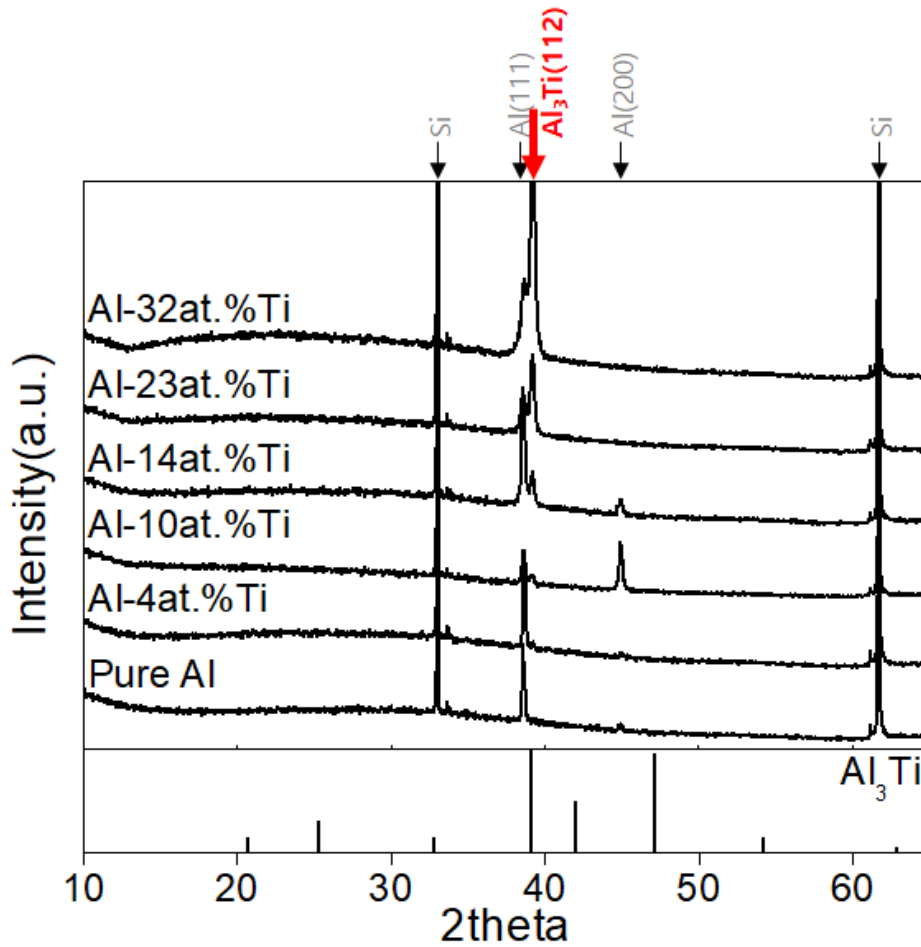
알루미늄합금 박막에서 급격한 압축 응력이 해소되는 현상이 발생한 원인에 대해 확인하기 위해서 XRD(X-ray diffraction) 분석을 진행하였다. Figure 4.4은 Al-Ti합금 박막, Figure 4.5는 Al-Ru합금 박막에 대한 XRD분석 결과이다. Ti를 도핑 시  $\text{Al}_3\text{Ti}(112)$  peak가 Ru을 도핑했을 때  $\text{Al}_6\text{Ru}(110)$  peak이 명확하게 검출되는 것이 확인되었다. 이 결과를 통해서 응력 평가에서 발생했던 압축 응력이 급격하게 해소되는 현상의 원인이 알루미늄합금 박막에서 특정한 화학적 조성을 가진 금속간화합물(inter-metallic compound)이 생성되기 때문이라는 것을

예상할 수 있었다. 하지만 이번 XRD분석은 모두 400℃ 열처리 후의 시료에 대해서 평가한 결과이기 때문에 온도 의존성에 대해서는 정확한 판단을 내릴 수 없었다. 그래서 추가적으로 열처리 온도에 따른 평가를 진행하였다.

Figure 4.6는 Al-14at.%Ru합금 박막을 100, 200, 300, 400, 500℃의 온도에서 1시간 동안 열처리를 진행한 후에 XRD분석을 통해 조성의 변화를 측정한 결과이다. 열처리 온도 300℃ 이상의 조건에서부터  $\text{Al}_6\text{Ru}(110)$  peak이 검출되는 것을 확인 할 수 있다. 즉, 200℃ 이하에서는  $\text{Al}_6\text{Ru}(110)$ 이 생성되지 않지만 300℃ 이상에서는  $\text{Al}_6\text{Ru}(110)$ 이 생성되는 것이다. 이는 응력 평가에서 압축 응력이 급격하게 해소되는 온도 구간과 정확하게 일치한다. 또한 Al-Ru의 상평형도를 확인하면  $\text{Al}_6\text{Ru}$ 가 생성되는 것을 역시 확인 할 수 있다.[4.1] 따라서 Al-Ti, Al-Ru합금 박막의 열처리 온도를 높여가면 응력의 탄성 변형 구간을 지난 이후에 압축 응력이 더 이상 증가하지 않는 지점에 다다르게 되면 금속간화합물이 생성되면서 박막에 압축 응력이 상당히 해소되는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 변화가 미세구조에 큰 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다.

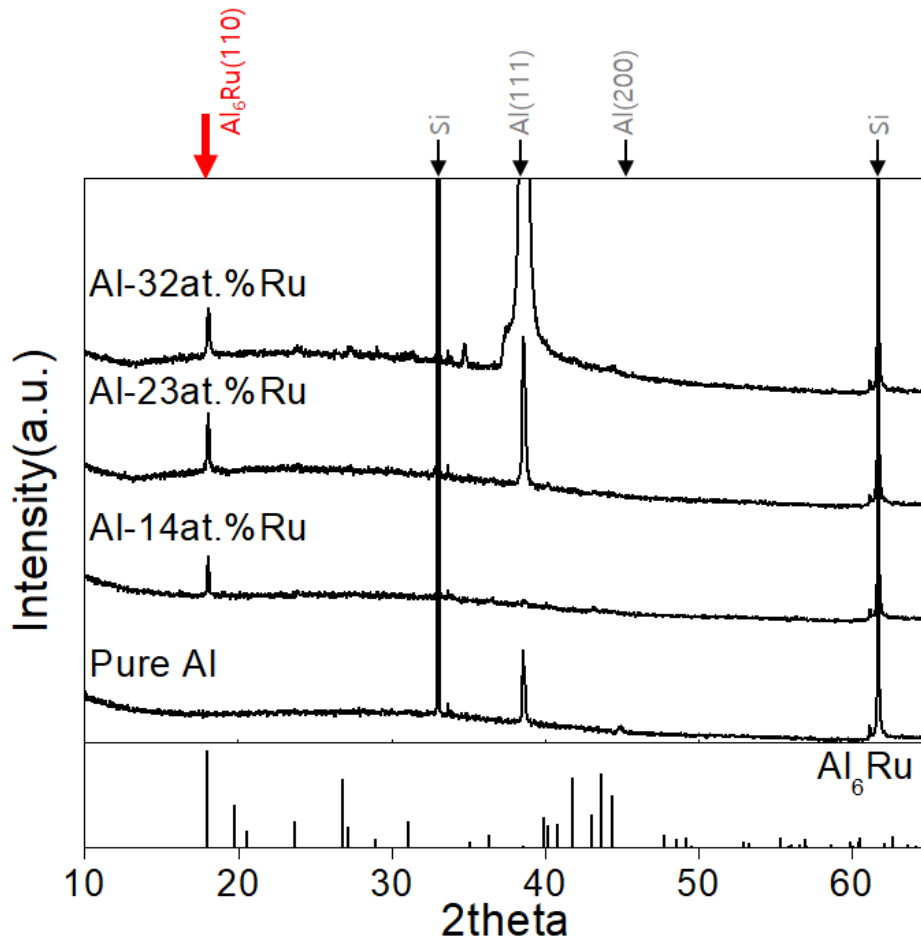


**Figure 4.3** Biaxial Stress change during thermal cycling by wafer curvature analysis in (a) Al film (b) Al-Ti alloy thin films (c) Al-Ru alloy thin films. Drastic compressive stress release was observed in Al alloy thin films(dotted line).

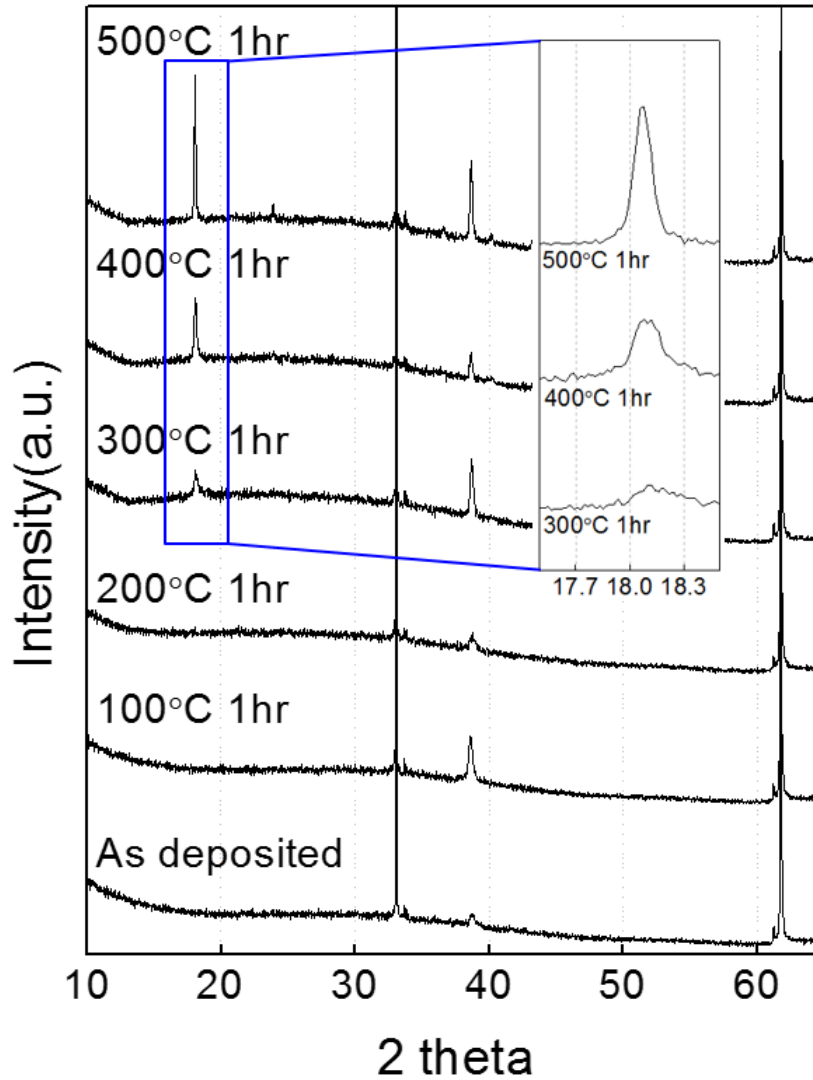


**Figure 4.4** XRD result in 4~32at.%Ti doped Al alloy films. Al<sub>3</sub>Ti(112) peak(red arrow) were observed all doped samples.





**Figure 4.5** XRD result in 14~32at.%Ru doped Al alloy films. Al<sub>6</sub>Ru(110) peak(red arrow) were observed all doped samples.



**Figure 4.6 XRD result in Al-14at.%Ru alloy films according to heat treatment temperature(100~500°C) for 1hr. It was found that the  $\text{Al}_6\text{Ru}$  peak appears at over 300°C.**

### 4.3. 박막의 미세구조 분석

#### 4.3.1. 표면 거칠기 분석

앞선 실험에서 알루미늄 배선에 Ti 와 Ru 을 도핑했을 때 박막에 작용하는 응력의 변화를 확인하였다. Al-Ti 와 Al-Ru 합금 박막을 온도를 점진적으로 상승시키면서 열처리를 진행하면 초기에는 Si substrate 와의 열팽창계수 차이에 의해 압축 응력이 선형적으로 증가하다가 특정 온도 이상에서 압축 응력이 급격히 해소되는 현상을 보여주었다. 박막 내부에 압축 응력이 감소하게 되면 hillock 은 감소하고 void 는 증가하는 방향으로 표면에 변화를 가져올 수 있다.

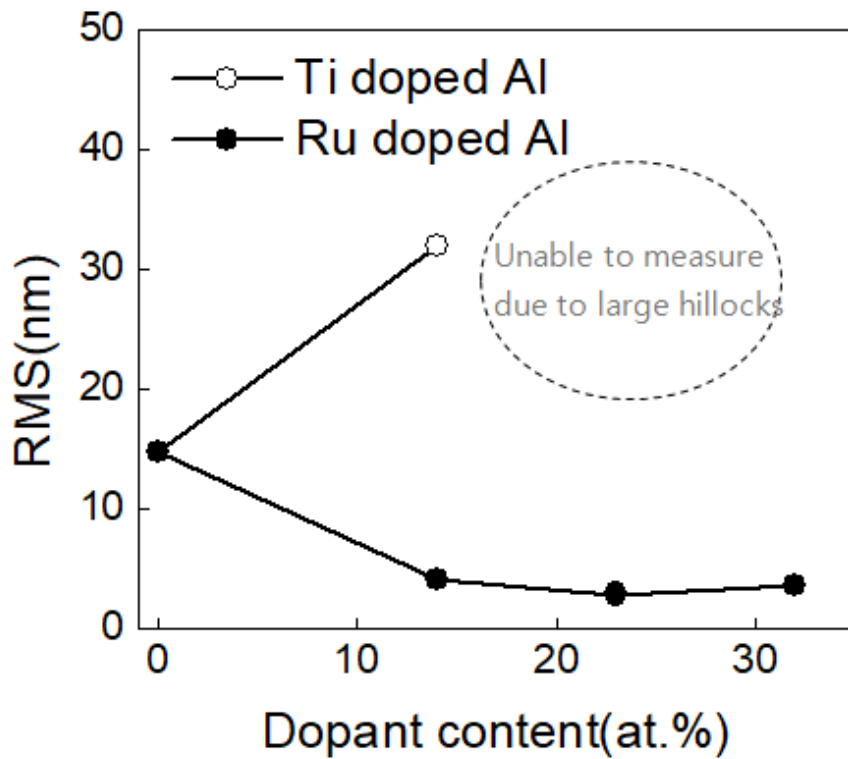
이러한 도핑 시에 발생하는 응력의 변화가 박막 표면에 미치는 영향을 확인하기 위하여 AFM 분석을 진행하였다. 모든 시료는 400℃에서 열처리를 진행한 후에  $40 \times 40 \mu\text{m}^2$  면적을 측정하였다.

Figure 4.7 은 AFM 분석 결과 전체 면적에 대한 RMS(root mean square) 값을 비교한 결과이다. 알루미늄 박막의 경우 RMS 가 14.7nm 인데 반하여 Al-Ru 합금 박막은 농도와 상관없이 RMS 가 4nm 이하로 우수했다. 반면에 Al-Ti 합금 박막에서는 23at.%Ti 이상의 농도의 시료는 높이가  $3 \mu\text{m}$  이상으로 AFM 분석의 허용치를 벗어나는 매우 큰 hillock 이 존재하여 분석이 불가능 했으며 14at.%Ti 시료에서도 RMS 가 30nm 이상으로 표면 거칠기가 매우 불량한 것을 확인하였다.

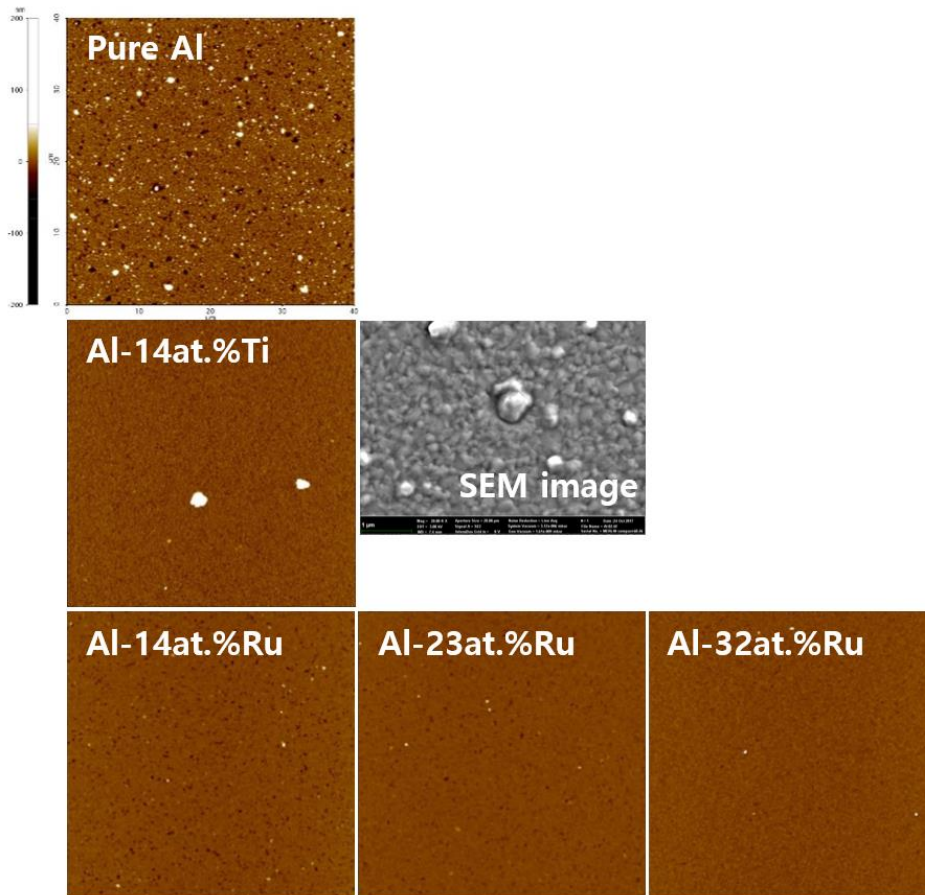
Figure 4.8 은 AFM 분석 image 인데 이를 보면 각 시료 표면의 상태를 직관적으로 알 수 있다. AFM image 의 밝은 부분은 돌출 된 것을 의미하며 어두울수록 함몰되어 있다는 것을 의미하는데 열처리를 거친 알루미늄 박막에는 다수의 hillock 과 void 가 존재하는 것을 확인 할 수

있다. Al-Ru 합금은 hillock 과 void 의 발생이 거의 억제되어 이로 인해 RMS 값이 낮게 나온 것으로 확인 된다. 반면에 Al-Ti 합금 박막은 hillock 과 void 의 개수는 알루미늄 박막 대비 상당히 줄었으나 수 $\mu\text{m}$ 의 높이를 가지는 hillock 이 소수 분포하였다. 지나치게 커다란 hillock 이 시료 제작 후 발생한 defect 로 의심되어 AFM 장비에 장착 된 OM(optical microscope)으로 표면을 관찰했을 때 전체 표면에 걸쳐서 매우 큰 hillock 이 분포하는 것을 확인하였다.

AFM 분석을 통해 알루미늄 박막에 Ru 을 증착했을 때 hillock 의 발생이 효과적으로 억제되는 것을 확인 할 수 있었다.



**Figure 4.7** Surface roughness(RMS) of Al and Al alloy films after 400°C annealing. It was found that the roughness of Al-Ru alloy films was improved.



**Figure 4.8** Surface image of Al and Al alloy films using AFM analysis after 400 °C annealing. Hillocks in Al-Ru alloy films were mostly suppressed.

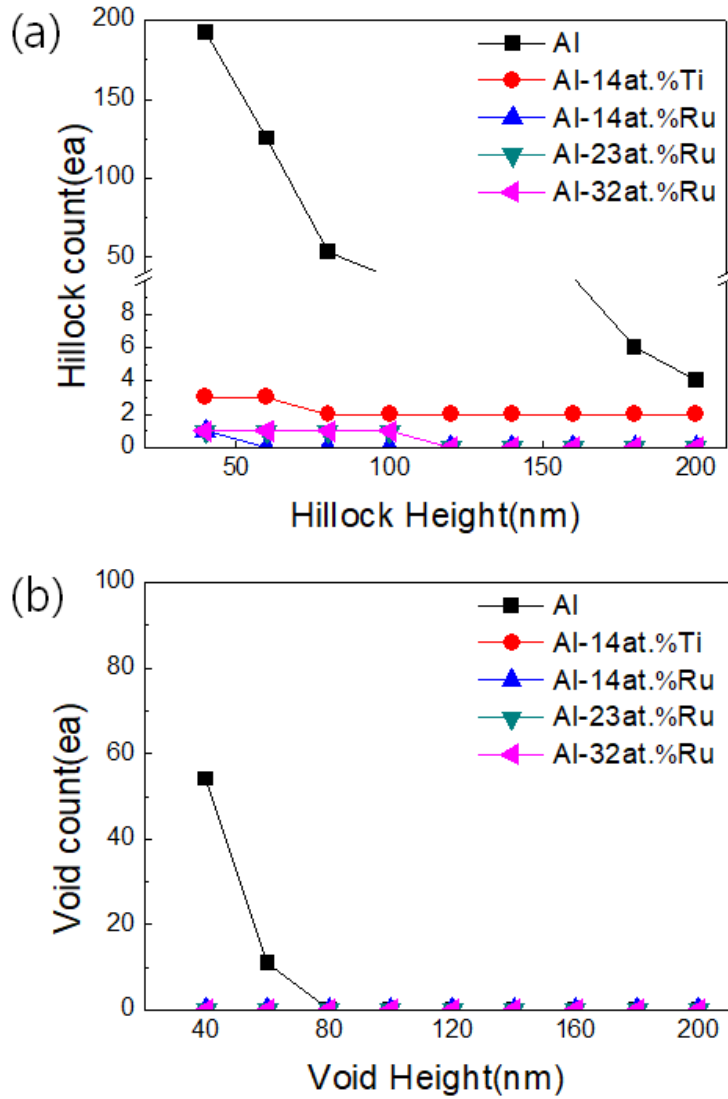
### 4.3.2. Hillock의 정량적 분석

AFM 분석을 통해서 박막 표면의 거칠기(RMS)와 대략적인 상태를 알 수 있었다. 하지만 RMS 값을 비교하는 것 만으로는 대조군간 hillock 의 발생 수준을 정량적으로 비교하는 것에 한계가 있다. 그래서 이번 분석에서는 AFM 이미지를 처리하여 hillock 과 void 의 높이에 따른 개수에 대한 정량적인 분석을 시도하였다.

AFM 이미지의 각각의 화소의 밝기는 표면의 높이를 의미한다. 따라서 화소의 밝기를 정확히 분류한다면 hillock 과 void 를 추출해 낼 수 있다. 분석 방법에 대한 설명은 3.3 절을 참고하기 바란다.

Figure 4.9 는 AFM 이미지를 처리하여 구한 hillock 과 void 의 높이 별 발생 개수를 나타낸다. 40nm 이상의 hillock 을 기준으로 알루미늄 박막과 비교해보면 알루미늄 박막은 192 개로 다수가 발생한 것에 반하여 합금 박막은 hillock 의 개수가 3 개 이하로 극적으로 개선 된 것을 알 수 있다. Al-Ti, Al-Ru 합금 박막 모두에서 hillock 의 밀도가 상당히 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

박막에 작용하는 응력 분석 실험에서 순수한 알루미늄 박막과는 달리 합금 박막에 열을 가하면 특정 온도 영역에서 압축 응력이 해소되는 현상이 확인 되었는데 압축응력이 해소되면서 박막 배부의 물질의 이동을 억제하여 hillock 의 발생이 억제되는 것으로 판단된다.



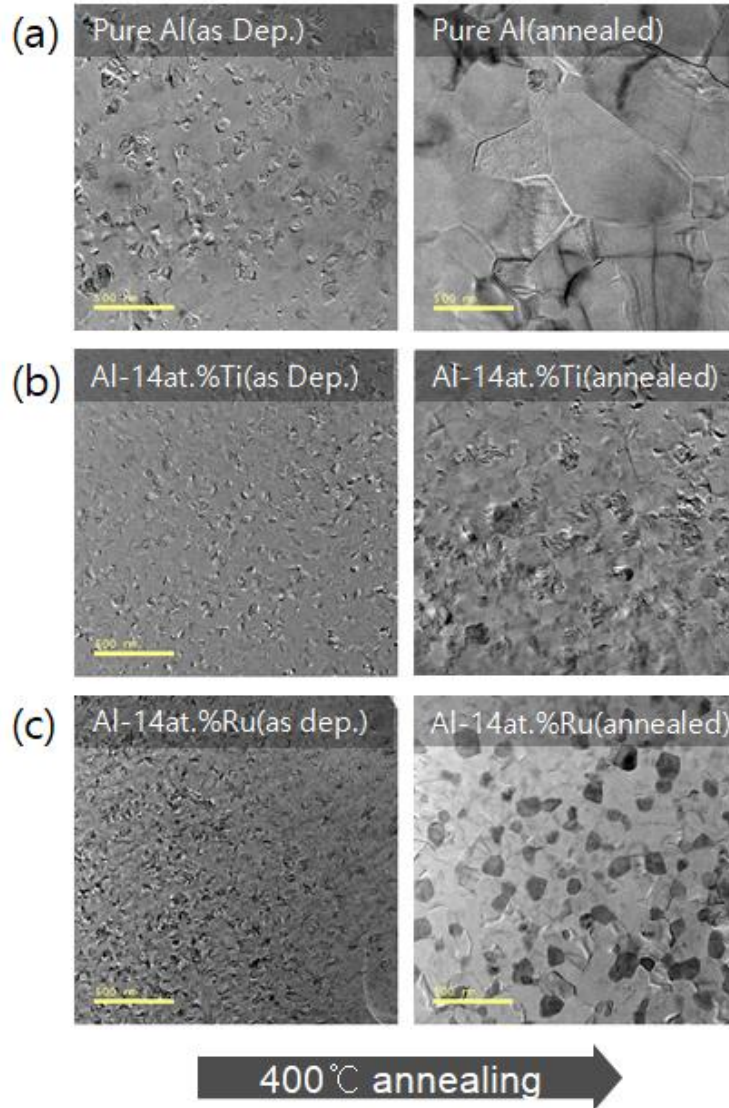
**Figure 4.9** (a) Hillocks and (b) voids count are plotted as a function of height.



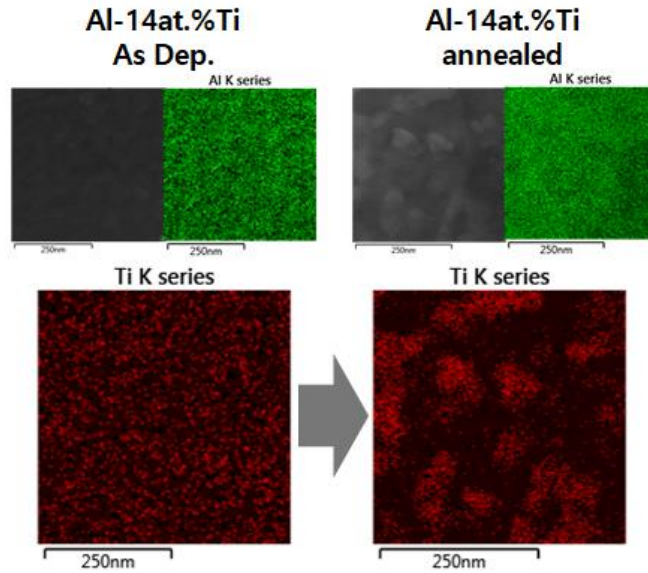
### 4.3.3. 집합조직의 TEM 분석

Figure 4.10-12 는 Pure Al, Al-14at.%Ti, Al-14at.%Ru 박막을 열처리 후 TEM 및 EDS 분석을 진행한 결과이다. Grain size 는 Pure Al 박막이 가장 크며 Ti/Ru doping 시 50nm 수준으로 매우 작아지는 것이 확인되었다. Grain size 는 hillock 형성에 상당히 큰 영향을 미치는데 일반적으로 grain size 가 작을수록 grain boundary 가 차지하는 부피가 증가하며 열처리 시 grain growth 가 진행되면서 grain boundary 가 감소된 만큼 compressive stress 가 release 되어 hillock 이 적게 생성되는 것으로 알려져 있다. 이번 연구에서도 Ti/Ru doping 시 hillock 의 밀도가 억제되는 결과가 도출되었는데 이는 doping 을 했을 때 grain size 가 작아진 것에 의한 것으로 확인된다.

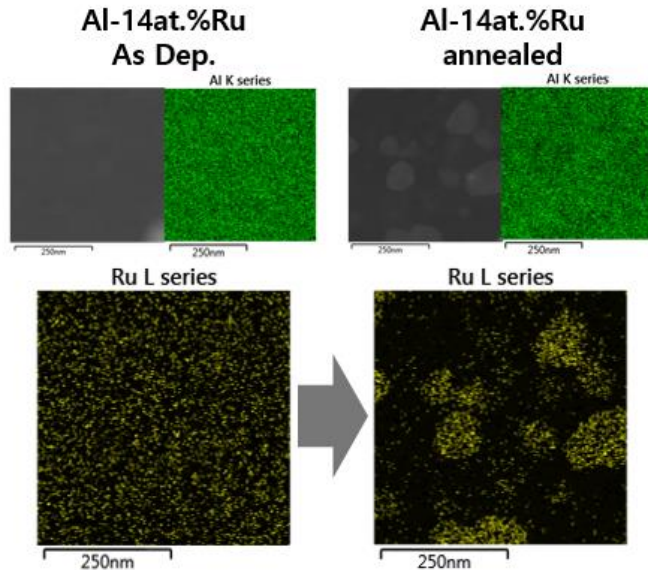
Grain size 가 작아지는 이유는 EDS 분석을 통해서 유추할 수 있다. 5.2.4 의 조성 분석 결과를 참고하면 Al-14at.%Ti, Al-14at.%Ru 박막 모두에서 alloy 가 형성되는 것이 관찰되었는데 EDS 분석 시에도 마찬가지로 박막에 많은 양의 alloy 가 석출되어 있는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 Alloy 박막에서는 결정립 삼중점(grain-boundary triple point)에서 쉽게 합금이 을 중심으로 석출되는 것으로 알려져 있다.[4.2] 이처럼 alloy 합금이 결정립 삼중점부터 석출되어 박막 전체에 걸쳐서 무작위로 분포함으로써 Al grain 의 growth 를 억제하여 grain 이 작아지는 것으로 확인된다.



**Figure 4.10** Plane-view TEM micrographs of (a) Al film (b) Al-Ti alloy thin films (c) Al-Ru alloy thin films. The grain size of all samples was enlarged after heat treatment.



**Figure 4.11** EDS image in Al-14at.%Ti films, showing that Al<sub>3</sub>Ti was precipitated.



**Figure 4.12** EDS image in Al-14at.%Ru films, showing that Al<sub>6</sub>Ru was precipitated.

#### 4.3.4. 결정립(grain) 크기 분석

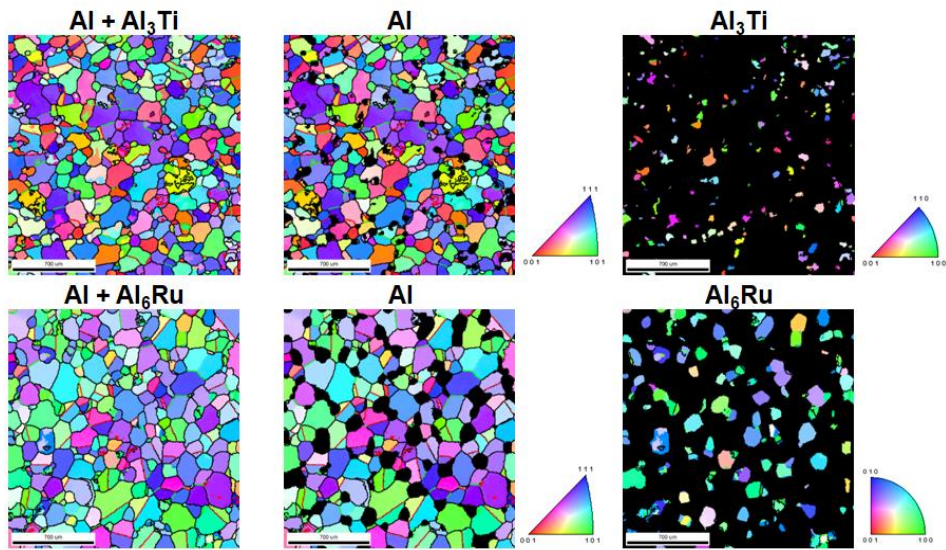
Figure 4.13 은 A-STAR 분석을 활용한 alloy 의 grain 분석 결과이다. Al-Ti alloy 와 Al-Ru alloy 박막을 비교해보면 Al grain 의 size 는 거의 유사한 크기를 가지고 있다. 하지만 alloy 석출은 Al<sub>6</sub>Ru 의 경우가 훨씬 크다는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 차이로 인하여 compressive stress 가 release 되는 정도에서 차이가 발생하여 표면 roughness 가 Ru 가 더 우수하게 나온 것으로 추정된다.

Figure 4.14 는 A-STAR 분석 결과를 토대로 data 처리를 통해서 정량적으로 grain size 를 도출한 결과이다. Al-Ti alloy 와 al-Ru alloy 의 평균적인 grain size 는 10% 이내의 차이로 거의 유사한 수준임을 알 수 있다. 면적의 대부분을 Pure Al grain 이 차지하고 있어 alloy 의 비율이 적기 때문에 평균적인 grain size 는 크게 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서 hillock 을 억제하는 데는 alloy grain size 가 더욱 큰 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있다.

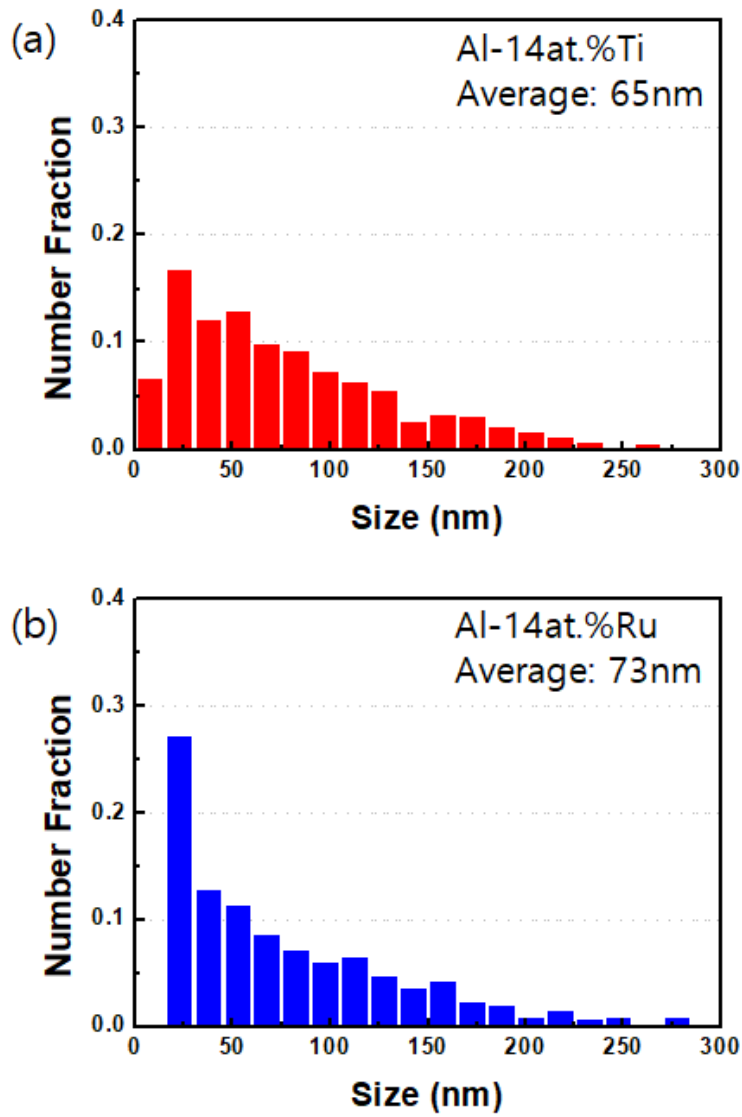
4.1 절의 전기적 특성 평가에서 Al-14at.%Ru 박막의 비저항이 Pure Al 과 유사한 수준으로 확인되었다. Micro-structure 관점에서 원인을 확인하기 위하여 grain 과 grain 의 misorientation angle 에 대한 분석을 정량적으로 시도해 보았다. Grain 과 grain 의 방향이 일정하게 정렬 될 경우 전자의 이동을 방해하지 않아 비저항이 낮을 수 있는 가능성이 있어서 분석을 진행하였다.

Figure 4.15 는 Al-Ti alloy 와 Al-Ru alloy 의 misorientation 의 분포를 나타내고 있다. 기대했던 바와는 다르게 두 alloy 간 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 저항에 영향을 줄만한 차이가 발생하지 않아 Al-Ru

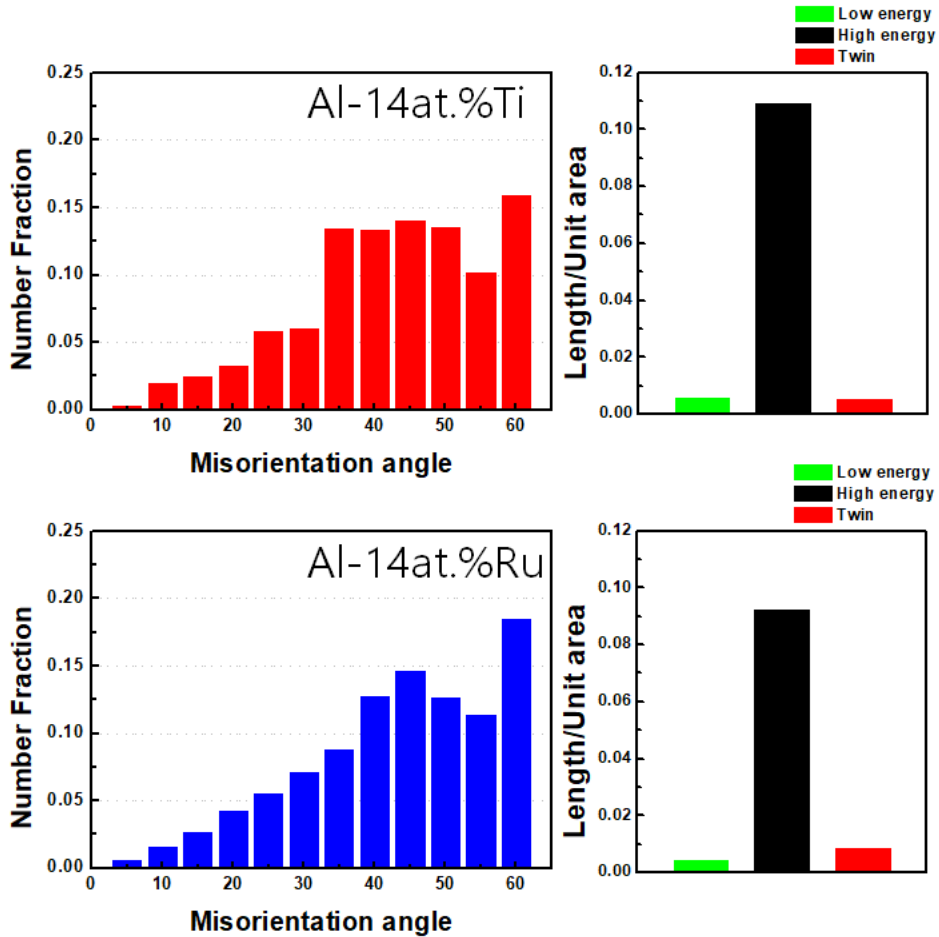
alloy 의 비저항이 낮았던 결과는 다른 원인에서 기인한 것으로 판단되며 추가 연구가 필요하다.



**Figure 4.13** Texture and grain morphology image in Al-14at.%Ti and Al-14at.%Ru alloy films after heat treatment.



**Figure 4.14 Grain size distribution in (a) Al-14at.%Ti and (b)Al-14at.%Ru alloy film after heat treatment.**



**Figure 4.15** Misorientation angle distribution of grain boundaries in (a) Al-14at.%Ti and (b) Al-14at.%Ru alloy film after heat treatment.



## 5. 요약 및 결론

반도체 금속 배선의 중요한 특성인 전기적 특성과 심각한 신뢰성 문제를 유발할 수 있는 hillock의 발생을 억제할 수 있는지 방안에 대한 연구를 진행하였다. Hillock을 억제하기 위하여 알루미늄 박막에 Ti, Ru 2가지 금속 원소를 도핑하는 방법을 선택했다.

먼저 알루미늄과 알루미늄합금 박막의 전기적 특성을 4point probe 장비를 사용하여 검증했을 때 14at.%Ru를 도핑했을 때 비저항이 순수한 알루미늄 박막과 비교해서 약 30% 증가하여 가장 우수한 결과를 보였다. 하지만 알루미늄 박막대비 상당히 높은 수준으로 이를 낮출 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.

둘째로 알루미늄과 알루미늄합금 박막의 표면 roughness에 대한 분석을 진행하였다. 표면 거칠기는 Al-Ru합금 박막이 hillock의 밀도 및 크기 측면에서 알루미늄 박막에 비해서 개선되는 모습을 보여주었다. RMS는 알루미늄의 14.7nm대비 4nm 이하로 70% 이상 개선되었고 hillock과 void의 발생이 발생하지 않는 수준으로 개선되는 것을 확인했다. Al-Ru합금 박막의 표면 roughness가 개선되는 원인은 TEM과 A-STAR 분석을 통해서 결점립 크기의 감소 및 합금이 석출되면서 박막 내부의 압축 응력이 해소되는 것에 기인하는 것을 확인하였다.

이처럼 전기적 특성 및 hillock 억제력에 대한 분석 결과를 통해서 Al-Ru합금 박막이 반도체 금속 배선으로 적용될 수 있는 가능성을 확인 할 수 있다.

## 참고문헌

- [1.1] M. T. Bohr *et al.* CMOS scaling trends and beyond. IEEE Micro 37, 20-29 (2017).
- [1.2] M. R. Baklanov *et al.* Advanced Interconnects: Materials, Processing, and Reliability, ECS J. Solid state Sci. Technol, 4, (2015)
- [1.3] J. D. Plummer *et al.* Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice and Modeling, Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, NJ(2000)
- [1.4] C. Volkert, *et al.* Deformation mechanisms of Al films on oxidized Si wafers. Journal of materials research 9, 1147-1155 (1994)
- [1.5] P. Chaudhari, Hillock growth in thin films. Journal of Applied Physics 45, 4339-4346 (1974).
- [1.6] C. -Y. Chang *et al.* Thermally induced hillock formation in Al–Cu films. Journal of Materials Research 4, 1172-1181 (1989).
- [1.7] E. Iwamura *et al.* A study of hillock formation on Al Ta alloy films for interconnections of TFT-LCDs. Thin Solid Films 270, 450-455 (1995).
- [1.8] F. Ericson *et al.* U. A transmission electron microscopy study of hillocks

- 
- in thin aluminum films. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena* 9, 58-63 (1991).
- [1.9] S.-J. Hwang *et al.* In situ study of stress relaxation mechanisms of pure Al thin films during isothermal annealing. *Scripta materialia* 54, 1841-1846 (2006).
- [1.10] S. -J. Hwang *et al.* Effect of film thickness and annealing temperature on hillock distributions in pure Al films. *Scripta materialia* 56, 17-20 (2007).
- [1.11] P. R. Besser *et al.* Measurement and interpretation of strain relaxation in passivated Al-0.5% Cu lines. *Journal of materials research* 11, 184-193 (1996).
- [1.12] S. Kordic *et al.* Stress voiding and electromigration phenomena in aluminum alloys. *Applied surface science* 91, 197-207 (1995).
- [2.1] W. D. Nix, Mechanical properties of thin films, *Metallurgical Transaction A*, 20A, 2217-2245 (1989)
- [2.2] M. Thouless *et al.* Stress development and relaxation in copper films during thermal cycling. *Journal of materials research* 8, 1845-1852 (1993).
- [2.3] H. J. Frost *et al.* Deformation-mechanism maps (Pergamon, Oxford, 1982)
- [2.4] R.P. Vinci *et al.* Thermal strain and stress in copper thin films. *Thin Solid Films* 262, 142-153, doi:10.1016/0040-6090(95)05834-6 (1995).

- [2.5] M. Murakami, Thermal strain in lead thin films II: strain relaxation mechanisms. *Thin Solid Films* 55, 101-111 (1978).
- [2.6] R. Venkatraman & J. C. Bravman, Separation of film thickness and grain boundary strengthening effects in Al thin films on Si. *Journal of materials research* 7, 2040-2048 (1992).
- [2.7] P.A. Flinn *et al.* Measurement and interpretation of stress in aluminum-based metallization as a function of thermal history. *IEEE Transactions on electron devices* 34, 689-699 (1987).
- [4.1] S. Mi *et al.* A study of the Al-rich part of the Al–Ru alloy system. *Intermetallics* 11, 643-649 (2003).
- [4.2] D. Frear *et al.* The evolution of microstructure in Al-2 Pct Cu thin films: Precipitation, dissolution, and reprecipitation. *Metallurgical and Materials Transactions A* 21, 2449-2458 (1990).

## Abstract

Aluminum has been used as global interconnects for D-RAM products due to relatively low resistivity( $2.7\mu\text{m}\cdot\text{cm}$ ) and compatibility with Si process. However, the difference in the thermal expansion coefficient (CTE) between Al and Si is very large, which can cause hillocks due to the stress applied to the Al interconnects during repeated heat treatment. These hillocks can lead to reliability problems, such as electrical circuit shorts between interconnects. Therefore, it is very important to find and control the factors that can suppress the hillocks in order to produce highly reliable products.

In this study, we will discuss the effect of doping other materials on Al thin films. Ti and Ru are selected as doping materials because the differences in the CTE with Si are smaller than Al and the melting point is high. Therefore, it is expected that the hillocks formation will be suppressed by the reduction of diffusion during repeated heat treatment.

Pure Al and Al alloy films were fabricated using DC magnetron sputter on SiO<sub>2</sub>/Si substrate. By the wafer curvature method, the abrupt compressive stress relaxation in both the Al-Ti and the Al-Ru alloy film was observed at a certain temperature range. It was found by XRD measurement that the alloy precipitated at this temperature range. By transmission electron microscopy and ASTAR analysis, compared with the Al-14at.%Ti alloy film, the amount of alloy 석출 in the Al-14at.%Ru alloy film is more than four times that of the Al-14at.%Ti alloy film. The surface roughness (RMS) using AFM analysis of the pure Al, the Al-14at.%Ti alloy and the Al-14at.%Ru alloy were 14.7nm, 19.4nm and 4nm, respectively. It was confirmed that hillock of the Al-14at.%Ru alloy was mostly suppressed.

Both the Al-Ti alloy film and the Al-Ru alloy film have smaller grain size than the pure Al film. As the grain size decreased, grain growth during annealing reduce the compressive stress and suppress the hillocks. In addition, more alloy 석출 was found in Al-Ru alloy film than in Al-Ti alloy film, which helps hillocks further suppressed due to densification. Hence, Ruthenium is interesting candidates with potential as dopant for Al interconnects.

---

**Keywords:** Aluminum interconnect, Aluminum, thin film stress, stress induced hillock, grain boundary diffusion, Al-Ti, Al-Ru